

BETONISANDWICH-ELEMENTIN  
KOSTEUSTEKNINEN TOIMINTA ENNEN  
JA JÄLKEEN LISÄLÄMMÖNERISTYKSEN

Markus Jokitalo  
2011  
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

BETONISANDWICH-ELEMENTIN  
KOSTEUSTEKNINEN TOIMINTA ENNEN  
JA JÄLKEEN LISÄLÄMMÖNERISTYKSEN

Markus Jokitalo  
Opinnäytetyö  
4.5.2011  
Rakennustekniikan koulutusohjelma  
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

Koulutusohjelma	Opinnäytetyö	Sivuja	+	Liitteitä
Rakennustekniikka		74	+	0
Suuntautumisvaihtoehto	Aika			
Rakennetekniikka	1.05.2011			
Työn tilaaja	Työn tekijä			
WSP Finland Oy	Markus Jokitalo			
Työn nimi				
Betonisandwich-elementtin kosteustekninen toiminta ennen ja jälkeen lisälämmöneristuksen				
Avainsanat				
Betonisandwich, kosteus, lämpö, rakennusfysiikka				

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli betonisandwich-elementin kosteusteknisen toiminnan tarkastelu ennen ja jälkeen lisäeristuksen. Tavoitteena oli saavuttaa yhtenevät suhteellisen kosteuden ja lämpötilanjakaumat ennen ja jälkeen lisäeristuksen WUFI Pro 5.0- ja COMSOL Multiphysics -ohjelmilla.

Aluksi perehdyttiin betonisandwich-elementin lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan sekä käsiteltiin ulkopuolista eristerappautta mineraalivillalla ja EPS-eristeellä. Sen jälkeen suoritettiin Oulussa sijaitsevaan kerrostaloon betonisandwich-elementin suhteellisen kosteuden ja lämpötilan seuranta kahden kuukauden ajan. Lopuksi ulkoseinärakenne US1 laskettiin WUFI- ja COMSOL-ohjelmilla ja saatuja tuloksia verrattiin mittaustuloksiin. US2- ja US3-ulkoseinärakenteiden lämpö- ja kosteuslaskelmat suoritettiin WUFI Pro 5.0 -ohjelmalla.

Lämpö- ja kosteuslaskelmien perusteella voitiin todeta, että tietokoneohjelmat kykenevät laskemaan hyvin yhteneviä tuloksia mittaustulosten kanssa. Lämpötilojen mitatut arvot olivat laskennallisten tulosten kanssa yhtenevät. Suhteellisten kosteuksien osalta mittausten ja tietokonesimulaatioilla laskettujen tulosten ero oli  $\pm 5\%$ .

Lämpö- ja kosteuslaskelmien tulosten pohjalta voitiin todeta, että kolmikerrosrapattu mineraalivilla lisäeristysrakenne ja ohutrapattu EPS-S-lisäeristysrakenne ovat lämpö- ja kosteusteknisesti toimivia ja turvallista toteuttaa, kun huolehditaan lämmöneristeen asennusaikaisesta suojauksesta.

Degree programme  
Civil Engineering

Thesis  
B.Sc.

Number of pages + appendices  
74 + 0

Line  
Structural Engineering

Date  
1.5.2011

Commissioned by  
WSP Finland Oy

Author  
Markus Jokitalo

Thesis title  
Moisture Technical Function of Concrete Sandwich Element before and after  
Extra Insulation

Keywords  
Concrete sandwich, moisture, heat, building physics

The aim of this bachelor thesis was to study the moisture technical function of concrete sandwich element before and after the extra insulation. The aim was to achieve similar moisture and heat distribution before and after extra insulation using WUFI Pro 5.0 and COMSOL Multiphysics software programmes.

At first, heat and moisture transfer in concrete sandwich element was analysed. After that, concrete sandwich elements moisture and temperature values were measured in block of flats in Oulu during two months. Finally, old exterior wall structure was calculated with WUFI and COMSOL software programmes. Extra insulations US2 and US3 in exterior wall structures were calculated using WUFI Pro 5.0 software programme.

As a result of heat and moisture calculation it was concluded that computer software programmes can be used as means of calculating heat and moisture transfer in structure. Measured heat values in exterior wall structure were confirmed to be similar to values given from computer software programmes. Differences in measured moisture values in exterior wall structure were confirmed to be within margin  $\pm 5$  %.

On the basis of heat and moisture calculations, it can be confirmed that both the three-layer plastered mineral wool insulation structure and the thin plastered EPS-S extra insulation structure are functional and safe to build when the insulation material is well covered and protected during the installation.

# SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KÄSITTEET .....	6
1 JOHDANTO .....	7
2 ULKOSEINÄRAKENTEEN RAKENNUSFYSIKAALINEN TARKASTELU .....	8
2.1 BSW-elementin kosteustekninen toiminta .....	9
2.1.1 Ulkoseinärakenteisiin vaikuttavat kosteusrasitukset.....	9
2.1.2 Ilman kosteus .....	11
2.1.3 Aineen kosteus.....	13
2.1.4 Olosuhdetekijöiden vaikutus.....	14
2.1.5 BSW-elementin kosteusrasitukset.....	15
2.1.6 Kosteuden siirtyminen rakenteissa .....	17
2.1.7 Kosteuden tiivistyminen.....	20
2.1.8 Kosteuden kuivuminen .....	23
2.1.9 Eristerappaus .....	25
2.2 BSW-elementin lämpötekniinen toiminta.....	28
2.3 Rakennusmateriaalit.....	30
3 TUTKITTAVAT ULKOSEINÄRAKENTEET .....	32
3.1 US1, vanha rakenne.....	32
3.2 US2, mineraalivillalla lisäeristetty rakenne .....	33
3.3 US3, EPS-S-polystyreenillä lisäeristetty rakenne .....	34
4 AS OY KAIJONHAKA .....	36
5 LÄMPÖ- JA KOSTEUSLASKELMAT .....	42
5.1 US1 lämpö- ja kosteuslaskelmien tulokset ja niiden vertailu mittaustuloksiin.....	42
5.2 Lisäeristettyjen ulkoseinärakenteiden lämpö- ja kosteuslaskelmat.....	56
5.2.1 Vanhan rakenteen kuivuminen lisäeristämisen jälkeen .....	61
5.2.2 US2- ja US3-ulkoseinärakenteiden lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaihtelut laskentapisteissä .....	63
6 JOHTOPÄÄTÖKSET .....	69
LÄHTEET .....	73
LIITE 1. Ulkoseinärakenteiden lämpö- ja kosteuslaskenta tulokset (yrityksen sisäisessä käytössä)	

## KÄSITTEET

BSW-elementti rakenne, joka koostuu betonisesta ulkokuoresta, lämmöneristeestä ja betonisesta sisäkuoresta. Opinnäytetyössä ulkokuoren betonin paksuus on 50 mm, lämmöneristeen paksuus 120 mm ja sisäkuoren betonin paksuus 90 mm.

EPS eriste, joka on valmistettu paisutetusta polystyreenistä (expanded polystyrene). S-merkintä tarkoittaa, että eriste on vaikeasti syttyvää. (1.)

Lämmönläpäisykerroin eli U-arvo

ilmaisee jatkuvuustilassa rakenteen läpi kulkevaa lämpövirtaa, joka kulkee  $1 \text{ m}^2$  kokoisen rakenteen osan läpi, kun lämpötila ero on yhden yksikön suuruinen rakenteen eri puolilla. U-arvon yksikkö on  $\text{W/m}^2\text{K}$ . (2, s. 41.)

Vesihöyryn läpäisevyys

ilmoittaa vesimäärän, joka läpäisee aikayksikössä pinta-yksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen tasaisineisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien ilmatilojen ja vesihöyryn pitoisuuksien ero tai vesihöyryn osapaine-ero on yksikön suuruinen. Vesihöyryn läpäisevyyden yksikkö on  $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$ . (3, s.12.)

Vesihöyryn tiiveys

on vesihöyrynläpäisevyyden käänteisarvo. Vesihöyryn tiiveyden yksikkö on  $(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})/\text{kg}$ . (3, s. 12.)

# 1 JOHDANTO

Ilmastomuutoksen myötä energian hinta kallistuu ja olemassa olevien asuin-kerrostalolähiöiden energiatehokkuuteen on sitä myöten alettu kiinnittää runsaasti huomiota. Ulkoseinärakenteiden lisälämmöneristykset ovat ajankoh-  
taisia lähes kaikissa lähiöiden asuin-kerrostaloissa. Asuinkiinteistöt käyttävät kokonaisenergiankulutuksesta noin 40 % ja kasvihuonepäästöistä noin 30 %.  
(4.)

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia Oulussa sijaitsevan As Oy Kai-jonhakan betonisandwich-elementin lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa en-nen ja jälkeen lisälämmöneristuksen. Rakennusfysikaaliset laskelmat suori-te-taan vanhalle BSW-elementille (US1), mineraalivillalla ulkopuolelta lisäeristetylle seinärakenteelle (US2) ja EPS-S-polystyreenieristeellä ulko-puolelta lisäeristetylle seinärakenteelle (US3). Kosteuslaskelmat suoritetaan WUFI Pro 5.0–ja COMSOL Multiphysics -ohjelmalla.

Opinnäytetyössä seurataan vanhan BSW-elementin (US1) lämpö- ja koste-usmittauksia ajalla 15.1.2011 - 23.2.2011. Saaduista mittaustuloksista muo-dostetaan lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kuvaajat. Mittaustuloksia ver-taillaan WUFI Pro 5.0- ja COMSOL Multiphysics -ohjelmalla saatuihin tuloksiin. Sisä- ja ulkoilman olosuhteiden mittaustuloksia hyödynnetään COMSOL-ohjelman kosteuslaskennoissa. WUFI Pro 5.0 -ohjelmalla suori-te-taan lämpö- ja kosteustekninen tarkastelu US2- ja US3-ulkoseinärakenteille.

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan niin sanottua perinteistä BSW-elementtiä sekä sen lisäeristämistä lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden kannalta. Tutkimuksen ulkopuolelle jätetään tuulettuvat ja tuuletusuralla varustetut BSW-rakenteet. Tässä opinnäytetyössä ei oteta kantaa mahdollisista vuo-doista aiheutuviin tai muihin vastaaviin äkillisiin kosteuskuormiin.

## 2 ULKOSEINÄRAKENTEEN RAKENNUSFYSIKAALINEN TARKASTELU

Ulkoseinä rakenne täytyy suunnitella suojaamaan rakennusta veden ja kosteuden haitallisilta vaikutuksilta sekä mahdollistavat rakennukselle vaadittujen lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden täyttyminen. Lämpöteknisiltä ominaisuuksiltaan ulkoseinä rakenteen tulee täyttää käyttötarkoituksen edellyttämät vaatimukset sekä tiiveyden että eristävyiden osalta. Ulkoseinä rakenteen läpi ei saa haitallisissa määrin kulkeutua kosteutta eikä se saa kertyä rakenteisiin. Mahdollinen rakenteisiin päässyt kosteus on päästävä kuivumaan rakenteesta vaurioita aiheuttamatta. (5, s. 31.)

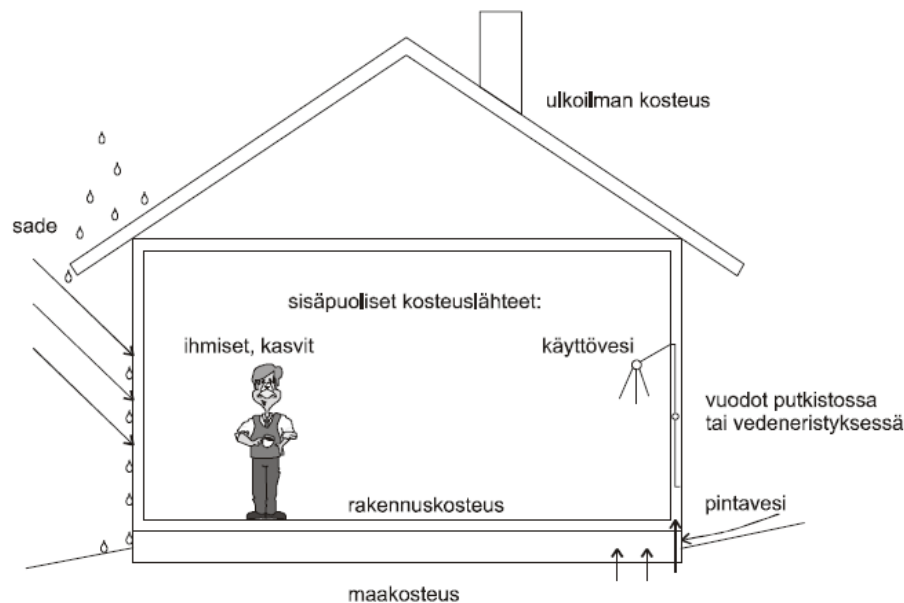
Julkisivulle kohdistuvaa viistosateen rasitusta voidaan vähentää muun muassa leveillä räystäillä erityisesti rakennuksen kulmissa ja yläosissa. Kerroksellisissa ulkoseinä rakenteissa, esimerkiksi eristerappauksissa, rakenne voi toimia ilman tuuletusrakojä ja uria, jos rakennekerrokset pystyvät sitomaan rakenteisiin päässeän kosteuden ja luovuttamaan kosteutta vaurioita aiheuttamatta. Eristerapatuissa rakenteissa tulee kerrosten kosteusläpäisyominaisuudet valita siten, että rakenteeseen ei synny kasvavaa kosteuskertymää ja mahdollinen rakenteeseen päässyt kosteus pääsee kuivumaan vapaasti. Ulkoseinä rakenteen läpäisevien läpivientien tiivisteiden tulee olla vesihöyry- ja ilmatiiviitä. (6, s. 60.)



## 2.1 BSW-elementin kosteustekninen toiminta

### 2.1.1 Ulkoseinärakenteisiin vaikuttavat kosteusrasitukset

Ulkoseinärakenteeseen vaikuttavia kosteuslähteitä ovat sade eri olomuodoissa, sisä- ja ulkoilman kosteuspitoisuus, maaperänkosteus, rakennuskosteus, pohjavesi, pintavesi, sisäpuoliset kosteuslähteet sekä mahdolliset vuoto- ja roiskevedet (kuva 1). Kosteuslähteiden vaikutus rakenteisiin riippuu rakennuksen käytöstä, vuodenajoista, säävaihteluista sekä vuorokausirytmistä. (7, s. 13.)



KUVA 1. Rakennuksen kosteuslähteet (7, s. 12)

Sade on kosteuslähteistä näkyvin. Se esiintyy eri olomuodoissa, kuten veteenä, lumena ja räntänä. Niin sanottu pystysade on Suomen yleisin sadetyyppi, joka rasittaa vaakasuoria ja vinoja pintoja sekä räystäättömien rakennusten seinien yläosia. Sade voi esiintyä myös viistosateena, joka rasittaa erityisesti rakennuksen pystysuoria pintoja. Viistosade kohdistuu rakennuksen vaippaan ja se on vaipan rasittavin kosteustekijä. Viistosateelle alttiiksi joutuvat erilaiset liitokset, kuten ikkunat ja ovet, täytyy suunnitella huolella. Rakennuksen korkeus, muoto, tuulensuunta sekä rakennuksen sijainti suhteessa

ympäristöön vaikuttavat siihen, että kosteusrasitus ei kohdistu tasaisesti julkisivulle. Suurimmat kosteusrasitukset viistosateesta aiheutuvat rakennuksen yläosaan sekä rakennuksen kulmiin. Voimakkaan tuulen vaikutuksesta sadevesi tai lumi voi nousta ylöspäin rakennuksen vaipan pinnalla. Tällöin lunta voi lunta kerääntyä muun muassa yläpohjaan ja vesi nousta vaakapaneloidussa vaipparakenteessa paneelien taakse. (2, s. 52; 6, s. 14.)

Perustuksille ja seinärakenteiden alaosille aiheutuu kosteusrasituksia lähinnä roiske- ja vajovedestä. Vajovesistä osa valuu maanpinnan kallistuksilla rakennuksesta pois päin ja osa imeytyy maahan ja perustusten läheisyyteen rasittaen perustuksia. (2, s. 52.)

Pohjavesi on pysyvästi maanpinnan alla olevaa vettä, jota on maa- tai kallio-perässä. Maahan imeytyvästä sadevedestä tulee pohjavettä. Pohjaveden pinnan korkeus vaihtelee alueittain. Se riippuu lisäksi muun muassa vuotuisesta sademäärästä ja viemäröinnistä. Pohjavedestä aiheutuu kosteusrasitusta rakennuksen perustuksille. Rakennuksen kaikki osat, myös kellari, tulisi mahdollisuuksien mukaan sijoittaa pohjavesipinnan yläpuolelle. (2, s. 52.)

Paineellisissa käyttövesiputkissa ja vettä käsittelevien laitteiden aiheuttamat vuodot ovat pahimpia kosteusvaurioiden aiheuttajia. Myös puutteellisista märkätilojen vesieristyksistä aiheutuu usein hallitsemattomia veden vuotoja rakenteisiin. Vuotojen syynä voivat olla esimerkiksi käyttöikänsä päähän tulleet käyttövesiputket tai huono/puutteellinen suunnittelu. (2, s. 52; 7, s. 22.)

Kapilaarinen vedenliike on materiaalien huokosten kautta kulkevaa kosteutta. Kosteus siirtyy huokosissa nesteinä. Kapilaarisen vedenliikettä tapahtuu yleensä niin kauan kunnes materiaalit saavuttavat tasapainokosteuden. Neste siirtyy kapilaarisesti ympäröivästä materiaalista huokoiseen materiaaliin. Huokoisia materiaaleja ovat muun muassa puu, tiili ja harkot. Kapilaarinen vedenliike rakenteissa tulee ottaa huomioon ja estää vedenliike kapilaarikatkolla. (2, s. 53.)

## 2.1.2 Ilman kosteus

Kaikki vedenpinnan yläpuolella olevat rakenteet sisältävät normaalioloissa jonkin verran kosteutta, riippuen materiaaliominaisuuksista ja ympäröivistä olosuhteista. Ympäröivässä ilmassa olevan vesihöyryn pitoisuutta voidaan ilmaista eri tavoin. (8, s. 44.)

Absoluuttisella kosteudella tarkoitetaan ilman tietyssä tilanteessa sisältämää vesimäärää. Rakenteita ympäröivässä ilmassa on aina jonkin verran kosteutta. Absoluuttisen kosteuden yksikkö on  $\text{g/m}^3$ . (2, s. 55.)

Suhteellinen kosteus tarkoittaa ilman todellisen vesihöyrypitoisuuden suhdetta ilman maksimi vesihöyrypitoisuuteen eli kyllästysvesihöyrypitoisuuteen (kaava 1). Suhteellinen kosteus on riippuvainen ilman lämpötilasta ja kosteuslähteistä. Suhteellinen kosteus ilmaistaan prosentteina. (7, s. 7.)

$$RH = \frac{v}{v_k} \quad \text{KAAVA 1}$$

$v$  = ilman sisältämä todellinen vesihöyrypitoisuus ( $\text{g/m}^3$ )  
 $v_k$  = kyllästysvesihöyrypitoisuus ( $\text{g/m}^3$ )

Ulkoilman vesihöyrypitoisuus vaihtelee Suomessa eri vuoden aikoina suhteellisen paljon. Kesäaikana vesihöyrypitoisuus on suurimmillaan ja talvikautena pienimmillään. Vesihöyrypitoisuudet ovat likimain yhtä suuret eri paikkakunnilla. (7, s. 12.)

Sisäilman kosteuteen vaikuttavia tekijöitä ovat ulkoilman suhteellinen kosteus, sisätilan ilmanvaihdon suuruus, rakennuksen tilavuus ja rakennuksen sisäiset kosteuslähteet. Sisäilman kosteus voidaan ilmaista kaavalla 2. (7, s. 14.)

$$v_s = v_u + \frac{G}{n \cdot V} \quad \text{KAAVA 2}$$

$v_s, v_u$  = sisä- ja ulkoilman absoluuttinen kosteus ( $\text{g/m}^3$ )

$G$  = sisätilan kosteustuotto ( $\text{g/h}$ )

$n$  = ilman vaihtoluku ( $1/\text{h}$ )

$V$  = sisätilan tilavuus ( $\text{m}^3$ )

Rakennuksen sisätilan kosteusvaihtelut voivat olla hyvin voimakkaita. Rakennuksen sisätiloissa voi hetkellisesti olla hyvinkin erisuuruisia sisäilman suhteellisia kosteuksia, kosteustuotoista riippuen (taulukko 2).

*TAULUKKO 2. Rakennuksen sisätilan kosteudentuottoarvoja (7, s. 15)*

Kosteuslähde	Kosteustuotto
Ihminen	40...300 g/h riippuen aktiviteetista (keskimäärin 90 g/h)
Kylpy	700 g/h
Suihku	2600 g/h
Keittiötoiminta	600...1500 g/h (päivittäinen keskiarvo noin 100 g/h)
Avoin vesipinta	40 $\text{g/m}^2\text{h}$
Kasvit	
- Pienet kasvit	7...15 g/h
- Keskikokoiset	10...20 g/h
Vaatteiden pesu ja kuivaus	
- Lingottu pyykki	10...50 g/h /kg kuivaa pyykkiä
- vettä tippuva	20...100 g/h /kg kuivaa pyykkiä

Kastepiste on lämpötila, jolloin ilman vesihöyryn pitoisuus ja kyllästyskosteus saavuttavat toisensa. Silloin vesihöyry tiivistyy vedeksi rakenteen pinnalla eli kondensoituu. Kondensoituminen tapahtuu useimmiten rakenteen kovalle ja kylmille pinnoille. Tiivistyminen voi tapahtua myös ilmassa. Kastepisteen yksikkö on  $^{\circ}\text{C}$ . (2, s. 55.)

Kyllästyspaine tarkoittaa suurinta mahdollista painetta, joka saavutetaan tietyssä lämpötilassa. Lämpötilan kasvaessa kyllästyspaine kasvaa. Kyllästyspaineen yksikkö on (Pa). (2, s. 55.)

Vesihöyryn osapaineella tarkoitetaan sitä painetta, jonka ympäröivä ilma aiheuttaa. Kun lämpötila ja vesihöyryn pitoisuudet kasvavat, vesihöyryn osapaine kasvaa. (2, s. 55.)

### 2.1.3 Aineen kosteus

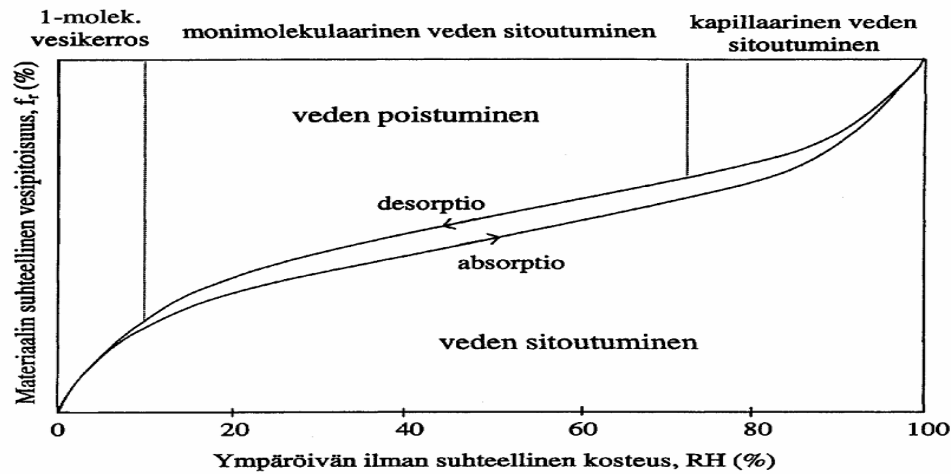
Rakennuskosteus on rakenteeseen sitoutunut kosteus ennen rakentamista ja rakentamisen aikana. Rakennuskosteutta poistuu rakenteesta niin paljon, että rakenne saavuttaa ympäristöolosuhteita vastaavan tasapainokosteuden. Rakennuskosteus on rakenteessa vapaana vetenä tai vesihöyrynä. Rakennuskosteuden määrään vaikuttavat valmistustekniikka, varastoinnin, kuljetuksen ja asennustyönaikaisen suojaus. Suurimmat rakennuskosteusmäärät ovat betoni- ja kevytbetonirakenteissa, muuratuissa rakenteissa ja rappauksissa. Taulukossa 3 on esitetty muutamien rakennusmateriaalien rakennuskosteuksia, kun ne ovat ympäristössä, jossa ilman suhteellinen kosteus on 50 %. (6, s. 23.)

*TAULUKKO 3. Eräiden rakennusmateriaalien normaaleja rakennuskosteuksia (7, s. 39)*

Materiaali	Rakennusvaiheen kosteus, kg/m <sup>3</sup>	Kemiallisesti sidottu kosteus, kg/m <sup>3</sup>	Tasapaino kosteus, kg/m <sup>3</sup>	Rakennuskosteus, kg/m <sup>3</sup>
Betoni K 15	180	40	25	115
Betoni K 25	180	60	30	90
Betoni K 40	180	70	40	70
Kevytbetoni	100 – 200		20	80 – 180
Kalkkisementti laasti	300	20	30	250
Tiili	10		10	0
Tiilimuuri	80		10	70
Puu	60		40	20

Tasapainokosteudella tarkoitetaan materiaalin sisältämää kosteusmäärää tietyssä ympäröivän ilman lämpötilassa ja kosteusrasitusolosuhteessa. Useilla rakennusmateriaaleilla on tasapainokosteuskäyrä (kuva 2) eli sorbtiokäyrä, joka ilmaisee aineen sitoman kosteuden prosentteina tietyssä suhteellisessa kosteudessa. Tasapainokosteus voi vaihdella samalla materiaalilla riippuen siitä, onko tasapainokosteus saavutettu materiaalin kastuessa (absorptio) vai materiaalin kuivuessa (desorptio). Materiaalin tasapainokosteuskuvaajassa on kaksi käyrää, joista ylempi ilmaisee aineen tasapainokosteutta aineen

kuivuessa ja alempi ilmaisee aineen tasapainokosteutta aineen kastuessa. (2, s. 61; 5, s. 31)



KUVA 2. Tasapainokosteuskäyrä (7, s. 37)

Kosteutta imeytyy huokoisiin rakennusmateriaaleihin, kuten betoniin, tiileen, puuhun ja laastiin niiden ollessa kosketuksissa veteen tai runsaasti vesihöyryä sisältävään ilmaan. Materiaaliin kertyvän kosteuden määrä riippuu olosuhteista, huokoskoosta, muodosta, määrästä ja huokosten ominaisuuksista. Ulkokuoren betoni imee hygroσκοoppisesti ilmasta vesihöyryä. BSW-elementeissä käytetyn julkisivubetonin vesisementtisuhde on yleensä niin alhainen, että veden imeytyminen kapillaarisesti ulkokuoren betonin läpi on vähäistä. (6, s. 31-32.)

#### 2.1.4 Olosuhdetekijöiden vaikutus

Ulkoseinärakenteen yli vaikuttavat ilmanpaine-erot vaikuttavat rakenteen kosteustekniseen toimintaan. Ilmanpaine-erot muodostuvat tuulesta, lämpötilaeroista sekä koneellisen ilmanvaihdon ja tiiviyssuhteiden yhteisvaikutuksesta. Esimerkiksi tuuli voi aiheuttaa rakennukseen joko yli- tai alipainetta riippuen talon geometriasta, tuulen nopeudesta ja suunnasta. Tuulenpuoleisen seinän ollessa muita seiniä epätiivimpi muodostuu rakennuksen sisälle ylipainetta. Alipainetta muodostuu, kun suurin osa ulkoseinän aukoista sijaitsee suojan puolella. Ulkoseinärakenteen kannalta rakennuksen sisäpuolinen ylipaine on haitallinen. (6, s. 26.)

Ulkoseinärakenteen sisä- ja ulkopuolella vallitsevista lämpötilaeroista johtuvaa ilmanpaine-eroa kutsutaan savupiippuilmioiksi tai termiseksi konvektioksi. Huoneilman lämmitessä sen tiheys pienenee ja se alkaa nousta ylöspäin. Tämän seurauksena huoneen yläosaan muodostuu ylipainetta ja alaosaan alipainetta. Ilmanpaine-eron suuntaan vaikuttaa vaipan epätiiviyskohtien sijainti. Savupiippu vaikutus toimii pakkasella ja jatkuvasti, joten se on merkittävä kondenssiin vaikuttava tekijä. (6, s. 26.)

Muita olosuhdetekijöitä ovat esimerkiksi auringon säteily ja lämpötilat rakenteen eri puolilla. Julkisivupinnan lämpötila kasvaa auringon säteilyn vaikutuksesta ja sen seurauksena kosteutta haihtuu julkisivun pinnalta tavallista nopeammin. (6, s. 26.)

### **2.1.5 BSW-elementin kosteusrasitukset**

Julkisivun kosteusrasitukset voidaan jakaa rakennustyönaikaiseen ja käytön-aikaiseen kosteusrasitukseen (kuva 3). Rakennusvaiheen aikaiset kosteusrasitukset BSW-elementeillä ovat huomattavasti suurempia kuin käyttö- ja kunnossapitovaiheen aikaiset kosteusrasitukset. (5, s. 32.)



KUVA 3. Periaatekuva BSW-ulkoseinärakenteen kosteusrasituksen jakautumisesta rakennustyönaikaiseen ja käytönaikaiseen kosteusrasitukseen (5, s. 33)

Rakennusvaiheessa eli elementin valmistusvaiheessa rakenteen kosteuslähteitä ovat betonissa oleva kemiallisesti sitoutumaton vesi sekä esimerkiksi pinnan pesut. Rakennustyön aikana vesi pääsee kulkeutumaan ulkoseinärakenteen eristetilaan suojaamattoman elementin yläpäästä ja avoimista saumoista. (5, s.32.)

Käyttö- ja kunnossapitovaiheessa kosteutta kulkeutuu seinärakenteen läpi **vesihöyryn diffuusiolla** eli vesihöyryn molekyylin liikkeen mukana ja vesihöyryn konvektiolla epätiiveyskohdista sisäpuolisen ylipaineen tapauksessa. Lisäksi vesi pääsee kulkeutumaan ulkoseinärakenteeseen ulkokuoren epäti-



veyskohdista viistosateella. Vesihöyryn konvektion ja erityisesti epätiiveyksien kautta siirtyvät kosteusmäärät ovat huomattavasti suurempia kuin diffuusiolla seinärakenteeseen kulkeutuva kosteus (5, s. 33; 6, s. 62).

### 2.1.6 Kosteuden siirtyminen rakenteissa

Rakenteissa kosteus voi siirtyä vesihöyryn diffuusion ja konvektiovirtauksien avulla, kapilaarisesti, painovoimaisesti alaspäin ja tuulen vaikutuksesta. Kosteutta voi siirtyä samanaikaisesti sekä vesihöyrynä että vetenä. (7, s. 22.)

Pääsääntöisesti BSW-elementin läpi kulkeutuu kosteutta diffuusion avulla. Seinärakenteen läpi kulkeutuva vesihöyryn diffuusio aiheutuu BSW-elementin eri puolilla vallitsevista ilman kosteuspitoisuuseroista tai toisin sanoen vesihöyryn osapaineiden eroista. Vesihöyryn diffuusion suunta on pääsääntöisesti sisältä ulospäin eli suuremmasta vesihöyryn pitoisuudesta pienempään vesihöyryn pitoisuuteen. Kesällä kosteuden kulkusuunta voi vaihdella ulko- ja sisäilman olosuhteiden vaihdellessa. Diffuusion avulla seinärakenteen läpi kulkeutuvaa kosteusmäärää voidaan pienentää esimerkiksi tiiviillä sisäpinnan maalilla sekä huolehtimalla siitä, että sisätilojen kosteuskertymä ei kasva haitallisen suureksi. (6, s. 32.)

Diffuusiolla jatkuvuustilassa kulkeva kosteuden määrä  $g$  ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ) ainekerroksen läpi voidaan laskea kaavoilla 3 ja 4 (6, s. 32).

$$g = \delta_v \cdot \left( \frac{\Delta v}{\Delta x} \right) \quad \text{KAAVA 3}$$

$\delta_v$  = vesihöyrynläpäisevyys ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$\Delta v$  = kosteusero matkalla  $x$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\Delta x$  = diffuusiomatka (m)

$$g = \delta_p \cdot \left( \frac{\Delta p}{\Delta x} \right) \quad \text{KAAVA 4}$$

$\delta_p$  = vesihöyryn läpäisevyys (kg/msPa)

$\Delta p$  = vesihöyryn osapaineen ero matkalla x (Pa)

$\Delta x$  = diffuusiomatka (m)

Vesihöyryn läpäisevyysarvojen  $\delta_v$  ja  $\delta_p$  välillä on kaavan 5 mukainen yhteys (6, s. 32).

$$\delta_v = 461,4 \cdot (273,15 + t) \cdot \delta_p \quad \text{KAAVA 5}$$

Kun rakenne koostuu homogeenisista ainekerroksista, saadaan sen läpi jatkuvuustilassa diffuusiolla kulkeva kosteusvirta g kaavasta 6 tai 7 (6, s. 32).

$$g = \frac{(v_s - v_u)}{\sum Z_v} \quad \text{KAAVA 6}$$

$$g = \frac{(p_s - p_u)}{\sum Z_p} \quad \text{KAAVA 7}$$

$v_s, v_u$  = vesihöyrymäärät sisä- ja ulkotilassa (kg/m<sup>3</sup>)

$p_s, p_u$  = vesihöyryn osapaine sisä- ja ulkoilmassa (Pa)

$Z = \frac{d}{\delta}$  = eri ainekerrosten vesihöyrynvastus  $Z_v$ (s/m) tai  $Z_p$ (m<sup>2</sup>sPa/kg)

$d$  = homogeenisen ainekerroksen paksuus (m)

**Vesihöyryn konvektiossa** vesihöyry siirtyy ilmapirran mukana ilmanpaineerojen vaikutuksesta. Sisäkuoren saumat, liittymät muihin rakenteisiin, läpiviennit sekä halkeamat voivat aiheuttaa merkittäviä paikallisia kosteuskertymiä. Vesihöyryn konvektion aiheuttavat rakenteen yli vaikuttavat ilmanpaineerot, jotka aiheuttavat ilmapirtauksia eli konvektiota. (6, s. 33; 8, s. 58.)

Konvektiovirtaukset vaikuttavat rakenteisiin kahdella eri tavalla. Sisältä ulospäin virtaava ilma jäähtyy ja sen seurauksena konvektion kuljettama kosteus

saattaa tiivistyä ja kerääntyä kylmemmille rakenteen ulkopinnoilla. Ulkoa sisäänpäin virtaava ilma lämpenee ja sen kosteuden sitomiskyky eli kosteuskapasiteetti kasvaa. Ulkoa sisäänpäin kulkeutuva konvektio kuivattaa rakennetta. On huomattava myöskin, että paikallisesti ulkoa sisäänpäin virtaava ilma voi jäähdyttää rakennetta, jonka seurauksena sisäilman vesihöyry saattaa tiivistyä esimerkiksi höyrysulun sisäpintaan. Konvektio heikentää lämmöneristyskerroksen lämmöneristyskykyä. (6, s. 34.)

Konvektion kosteusvirta  $g$  (kg/s) voidaan laskea kaavan 7 avulla (8, s. 58).

$$g = v \cdot Q \quad \text{KAAVA 7}$$

$v$  = ilman vesihöyrypitoisuus (kg/m<sup>3</sup>)

$Q$  = rakenteen läpi virtaava ilmamäärä (m<sup>3</sup>/s)

Tarkasteltaessa rakennetta, jonka eri puolilla vallitsee erilainen vesihöyrynpitoisuus, kosteusvirta ilmaistaan kaavan 8 avulla (7, s. 31).

$$g = (v_s - v_u) \cdot Q \quad \text{KAAVA 8}$$

$v_s, v_u$  = vesihöyryn sisä- ja ulkoilman pitoisuudet (kg/m<sup>3</sup>)

Kaava 8 edellyttää, että vesihöyryä ei tiivisty rakenteeseen.

Ilmavirtaus ( $Q$ ) huokoisen materiaalin läpi voidaan laskea kaavalla 9 (7, s. 31).

$$Q = \frac{B_0 \Delta p}{\eta d} \cdot A \quad \text{KAAVA 9}$$

$B_0$  = materiaalin ilmanläpäisevyys (m<sup>2</sup>)

$\eta$  = ilman dynaaminen viskositeetti (Ns/m<sup>2</sup>)

$\Delta p$  = ilmanpaine-ero kerroksen yli (Pa)

$d$ = kerroksen pakuus (m)

$A$ = virtauspinta-ala ( $m^2$ )

**Kapilaarinen veden siirtyminen** syntyy läpimitaltaan pienen kapilaarihuokosen ja veden pinnan vuorovaikutuksesta, jonka aiheuttaa veden pintajännitys. Kapilaarinen siirtyminen aiheutuu huokosalipaineesta. Kapilaarisesti imeytyvän veden määrä riippuu huokoskoon ja huokosverkoston yhtenäisyyden perusteella. Kun huokoskoko kasvaa, kapilaarinen imuvoima ja nousukorkeus vähenevät. Huokoskoon kasvaessa imuvoima ja kosteudenjohtavuus lisääntyvät. (6, s. 34.)

Kun tiivistyvät kosteusmäärät ovat suuria, voi kosteutta siirtyä BSW-elementissä veden muodossa painovoimaisesti. BSW-elementissä **veden painovoimaista siirtymistä** tapahtuu ulkokuoren sisäpinnalla. Tämä tulee ottaa huomioon rakenteita suunniteltaessa niin, että valuva vesi ei pääse vaurioittamaan rakenteita. (7, s. 26.)

Tuulenpaineen ja viistosateen yhteisvaikutuksesta voi vettä siirtyä rakenteisiin rakojen ja halkeamien kautta. Elementtien haljenneet saumat ja huonosti suunnitellut ja toteutetut suojapellitykset edesauttavat kosteuden pääsyä rakenteisiin. (7, s. 27.)

## 2.1.7 Kosteuden tiivistyminen

Seinärakenteen lävitse kulkevasta kosteudesta osa tiivistyy vedeksi joutuaan kosketuksiin sellaisen pinnan tai huokosseinämän kanssa, jonka lämpötila alittaa kastepistelämpötilan. Jotta pinnalle ei tiivistyisi kosteutta, pintalämpötilan täytyy olla suurempi kuin ympäröivän ilman kastepistelämpötilan. (8, s. 66.)

Talvikautena kosteus tiivistyy BSW-elementin ulkokuoren sisäpintaan muodostaen siihen vesi- ja jääkerroksen. Ulkokuoren sisäpintaan tiivistyvän kosteuden määrät riippuvat muun muassa eristepaksuudesta sekä sisäpuolen betonin pinnassa olevan maalin vesihöyryn läpäisevyydestä. Tiivistyvä kos-

teus imeytyy ulkokuoren huokosverkostoon sekä kulkeutuu diffuusiolla ulkokuoren läpi. Tiivistyvien kosteusmäärien ollessa suuria osa kosteudesta va-luu ulkokuoren sisäpintaa pitkin alaspäin. (5, s. 33.)

Ratkaisevia tekijöitä kosteuden tiivistymiselle BSW-elementin sisäpinnoille ovat rakenteen lämmönvastus, sisäpinnan lämmönvastus, sisäilman koste-uspitoisuus ja ulkoilman lämpötila. Näistä tekijöistä kolmeen ensimmäiseen voidaan vaikuttaa teknisin toimenpitein. Kosteuden tiivistymistä tapahtuu yleensä talvella pakkasjaksojen aikana. (8, s. 66.)

Kosteuden tiivistymisen laskenta on olennainen osa kosteusteknistä tarkas-telua. **Vesihöyryn diffuusion kondenssia** eli tiivistyvän kosteuden määrää voidaan arvioida yksinkertaisilla käsilaskentamenetelmillä. Käsilaskentame-netelmässä lämpötilana ja kosteusmääränä käytetään kuukausikeskiarvoja. Lämmönjohtavuus arvoina käytetään kuivan villan lämmönjohtavuusarvoja. Todellisuudessa olosuhteet muuttuvat jatkuvasti seinärakenteen ympärillä. Laskelmissa ei huomioida muun muassa aineen kykyä sitoa ja luovuttaa kos-teutta, muita kosteuden siirtymismuotoja sekä kosteuden ja lämmönsiirtymi-sen vaikutusta toisiinsa. Tarkkoja kosteuslaskelmia ei käsin laskennalla pys-tytä suorittamaan. Luotettavampia kosteuslaskelmia kyetään suorittamaan tietokoneohjelmilla, jotka pystyvät huomioimaan useita samanaikaisesti muuttuvia tekijöitä. (6, s. 38.)

Vesihöyryn osapaine ja lämpötila kohdassa x saadaan kaavoista 10 ja 11(6, s. 39).

$$p_x = p_s - \frac{\sum Z_x}{\sum Z} \cdot (p_s - p_u) \quad \text{KAAVA 10}$$

$$t_x = t_s - \frac{\sum R_x}{\sum R} \cdot (t_s - t_u) \quad \text{KAAVA 11}$$

$p_x$  = vesihöyryn osapaine kohdassa x (pa)

$\sum Z_x$  = sisäpinnasta kohtaan x olevien kerrosten vesihöyryn vastusten summa (m<sup>2</sup>sPa/kg)

$\sum Z$  = koko rakenteen vesihöyryn vastus (m<sup>2</sup>sPa/kg)

$p_s, p_u$  = vesihöyryn osa-paineet sisä- ja ulkoilmassa (Pa)

$t_x$  = lämpötila kohdassa x (°C)

$\sum R_x$  = lämmönvastus sisäpinnasta kohtaan x (m<sup>2</sup>°C/W)

$\sum R$  = koko rakenteen lämmönvastus (m<sup>2</sup>°C/W)

$t_s, t_u$  = sisä- ja ulkoilman lämpötilat (°C)

Tiivistyvän kosteuden määrä ainekerrosten välisessä rajapinnassa x aikayksikössä lasketaan kaavalla 12 (6, s. 39).

$$g_{tiiv} = \frac{p_s - p_x}{\sum Z_x} - \frac{p_x - p_u}{\sum Z - \sum Z_x} \quad \text{KAAVA 12}$$

Kaavan ensimmäinen termi kuvaa sisältä rakenteeseen tulevaa ja kondensoituvaa kosteuden määrää ja jälkimmäinen termi kuvaa kosteusmäärää, joka samanaikaisesti poistuu tiivistymiskohdasta ulkoilmaan (8, s. 69).

Rakenteeseen kerääntyvän kosteuden määrä lasketaan kaavalla 13 (6, s. 40).

$$G_{tiiv} = g_{tiiv} \cdot t_{tiiv} \quad \text{KAAVA 13}$$

$g_{tiiv}$  = rakenteeseen aikayksikössä kerääntyvä kosteus (kg/m<sup>2</sup>s)

$t_{tiiv}$  = tiivistymisajanjakso (s)

**Konvektion kondenssin** eli konvektiovirtauksien avulla rakenteeseen tiivistyvä kosteus, kulkeutuu ensisijaisesti rakojen ja reikien kautta. Kondenssia

tapahtuu sisältä ulos kulkevan virtauksen yhteydessä. Herkkiä kohtia ilmavirtauksille ovat elementtien saumat ja liitoskohdat. Rakenteisiin tiivistyvän eli kondensoituvan kosteuden määrä riippuu virtaavan ilman kosteuspitoisuudesta, ulkoilman lämpötilasta, ilmavirtauksen jäähtymisestä rakenteen sisällä ja ilmavirtauksen kosteuspitoisuuden tasaisuudesta. (6, s. 42; 8, s. 78.)

Konvektionvirtauksella seinärakenteeseen tiivistyvää kosteuden maksimimäärä on esitetty kaavassa 7. Todellisuudessa osa ilmavirtauksen mukana siirtyvästä kosteudesta kulkeutuu seinärakenteen lävitse ja osa tiivistyy rakenteen pinnalla, joten todellista konvektion kondenssin määrää on vaikea arvioida. (6, s. 42.)

### 2.1.8 Kosteuden kuivuminen

Kuivumisjaksolla rakenteesta poistuvan kosteuden määrää  $g_{kuiv}$  (kg/m<sup>2</sup>s) aikayksikössä voidaan laskea kaavalla 14 (6, s. 40).

$$g_{kuiv} = \frac{p_x - p_u}{\sum Z - \sum Z_x} + \frac{p_x - p_s}{Z_x} \quad \text{KAAVA 14}$$

$p_x$  = vesihöyryn osapaine kohdassa x (Pa)

$\sum Z_x$  = sisäpinnasta kohtaan x olevien kerrosten vesihöyryn vastusten summa (m<sup>2</sup>sPa/kg)

$\sum Z$  = koko rakenteen vesihöyryn vastus (m<sup>2</sup>sPa/kg)

$p_s, p_u$  = vesihöyryn osa-paineet sisä- ja ulkoilmassa (Pa)

Kaavan ensimmäinen termi kuvaa tiivistymiskohdasta ulospäin kuivuvan kosteuden määrää ja jälkimmäinen termi kuvaa tiivistymiskohdasta sisäänpäin kuivuvan kosteuden määrää (8, s. 70.)

Kuivumisjakson  $t_{kuiv}$  aikana rakenteesta poistuvan kosteuden määrä  $G_{kuiv}$  saadaan kaavalla 15 (6, s. 40).

$$G_{kuiv} = g_{kuiv} \cdot t_{kuiv}$$

KAAVA 15

Tuulettumattomien ulkoseinärakenteissa kosteus poistuu rakenteesta diffuusiolla ulkokuoren sekä mahdollisen pinnoitteen läpi kaavojen 14 ja 15 mukaan. Tuulettuvissa ulkoseinärakenteissa kosteus haihtuu lisäksi tuuletusraon tai ilmavirtauskanavien ja tuuletusaukkojen kautta nopeuttaen rakenteen kuivumista. Kosteuden kuivumiseen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa betonin materiaaliominaisuudet, rakennekosteus ja lämpötila sekä käytetty julkisivupinnoite. (5, s. 34.)

BSW-elementin lämmöneristekerroksessa on usein uritus ulkokuoren betonipintaa vasten. Tuuletusurien kautta virtaava ilma sitoo kosteutta ja kuivattaa rakennetta. Tuuletuksen sitoma kosteus määrä riippuu ilmavirran suuruudesta ja ilman lämpötilasta. Erityisesti rakennekosteuden kuivuminen on huomattavasti nopeampaa tuuletusurallisissa rakenteissa kuin tuulettumattomissa rakenteissa. Urituksen toiminnan kannalta on tärkeää, että ilma pääsee esteettä kulkemaan tuuletusurissa. (5, s. 34.) Tutkimustulosten perusteella BSW-elementin tuuletus tehostaa merkittävästi seinärakenteen kuivumista. Lähteen 2 mukaan BSW-rakenteen kosteusteknisen toimivuuden minimiväitimuksena voidaan pitää uritetun lämmöneristeen käyttöä. (5, s. 63.)

BSW-ulkoseinän kannalta merkittävä tekijä rakenteen kuivumisessa on rakennekosteuden kuivuminen. BSW-elementin valun jälkeen betonista poistuu vettä noin  $80 \text{ kg/m}^3$ . Jotta rakennuskosteus pääsee kuivumaan kohtuullisessa ajassa, on tärkeää, ettei sisäpintoja pinnoiteta liian aikaisin, jolloin kuivuminen sisäänpäin hidastuisi huomattavasti. (6, s. 64.)

Ulkoseinän kastuminen johtuu ensisijaisesti viistosateesta. Viistosateella ulkoseinärakenne kostuu huomattavasti enemmän kuin diffuusion ja konvektion vaikutuksesta tapahtuva kastuminen. Ulkoseinärakenteen kuivuminen viistosateen jälkeen riippuu ulkoilman suhteellisesta kosteudesta, auringon lämpösäteilyn aiheuttamasta erosta ulkoilman ja julkisivupinnan välille sekä tuulesta. Kuivuminen tapahtuu huomattavasti hitaammin kuin kastuminen. (6, s. 42; 8, s. 79.)



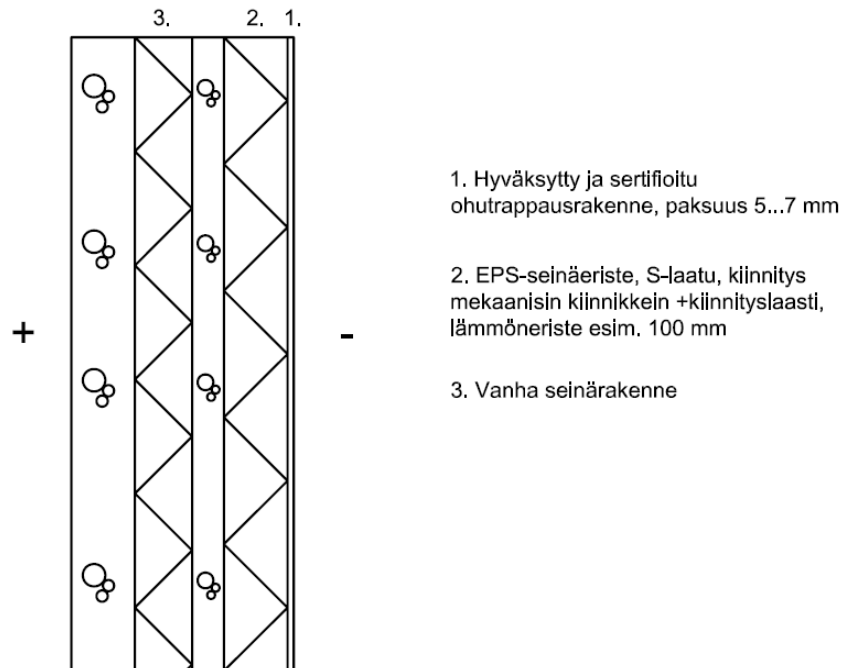
## 2.1.9 Eristerappaus

Eristerappaus voidaan kiinnittää vanhaan runkorakenteeseen tai vanhaan seinärakenteeseen, jos seinärakenteen betoninkunto kestää eristerappauksen kuormituksen. Eristerappaus koostuu eristekerroksesta, rappausverkosta ja sen päälle tehdystä rappauspinnasta. Eristerappausta voidaan käyttää sekä uudis- että korjausrakentamisessa. Rappauspinta voidaan tehdä joko ohutrappauksena tai useampikerrosrappauksena. (6, s. 73.)

Tyypillinen eristerappauskohde on vanhan seinärakenteen lisäeristäminen. Lisäeriste sijoitetaan tyypillisesti julkisivun ulkopuolelle, koska se on kosteus- ja lämpöteknisesti parempi ratkaisu kuin rakennuksen sisäpuolelle sijoitettava lisäeristys. Eristerappaus suojaa vanhaa seinärakennetta ja vanha seinärakenne pääsee kuivumaan, koska vanhan seinärakenteen lämpötila nousee, mikäli mahdollinen kosteus voi poistua uuden rakenteen läpi alusrakenteesta. Tällöin vanhan seinärakenteen pakkasrapautuminen ja karbonisoituminen saadaan pienenemään. Ulkoseinärakenteen ulkopuolelle sijoitettu lisäeristys katkaisee tehokkaasti välipohjien ja –seinien muodostamat kylmäsilat. Tuuletusrakoja ei saa jättää lisäeristysten taakse, vaan vanha ja uusirakenne on toimittava yhtenä kokonaisuutena. (6, s. 73.)

Eristerapattavalle vanhalle seinärakenteelle on aina tehtävä perusteellinen kuntotutkimus, jonka perusteella päätetään, puretaanko vanha ulkokuori vai ei.

**EPS-S-polystyreenistä tehdyssä eristerappauksessa** käytetään rappauspintana orgaanisista laasteista tehtyä ohutrappausta (kuva 4.) EPS-S-lämmöneristeet kiinnitetään seinään mekaanisin kiinnikkein sekä kiinnityslaastilla. EPS-S-lämmöneristeet ovat kevyitä ja niitä on helppo käsitellä. Rappausverkkona käytetään lasikuituverkkoa. Korjauskohteissa ei yleensä tarvitse tehdä mittavia purkutoimenpiteitä eikä seinärakenteiden vahvistuksia vaan lisäeristysrakenne voidaan sijoittaa vanhan rakenteen ulkopintaan. (9.)



KUVA 4. EPS-S-polystyreenillä lisäeristetyin BSW-elementin periaatekuva (9)

EPS-eristeet ovat tiiviitä ja soveltuvat siten rakenteisiin, joissa alusrakenteen vesihöyrynvastus on suuri, kuten betoni-, kevytbetoni-, kalkkihiekkatiili- ja tiilialustoilla. Alusrakenteen täytyy olla tiivis, koska tällöin rakennuksen sisätiloista tuleva kosteus ei pääse haitallisissa määrin tiivistymään eristeeseen tai lisäeristykseen rajapintoihin. Kosteuden tiivistyminen lisäeristykseen rajapintoihin ja eristekerrokseen tulee tarvittaessa arvioida laskennallisesti (6, s. 73-74.)

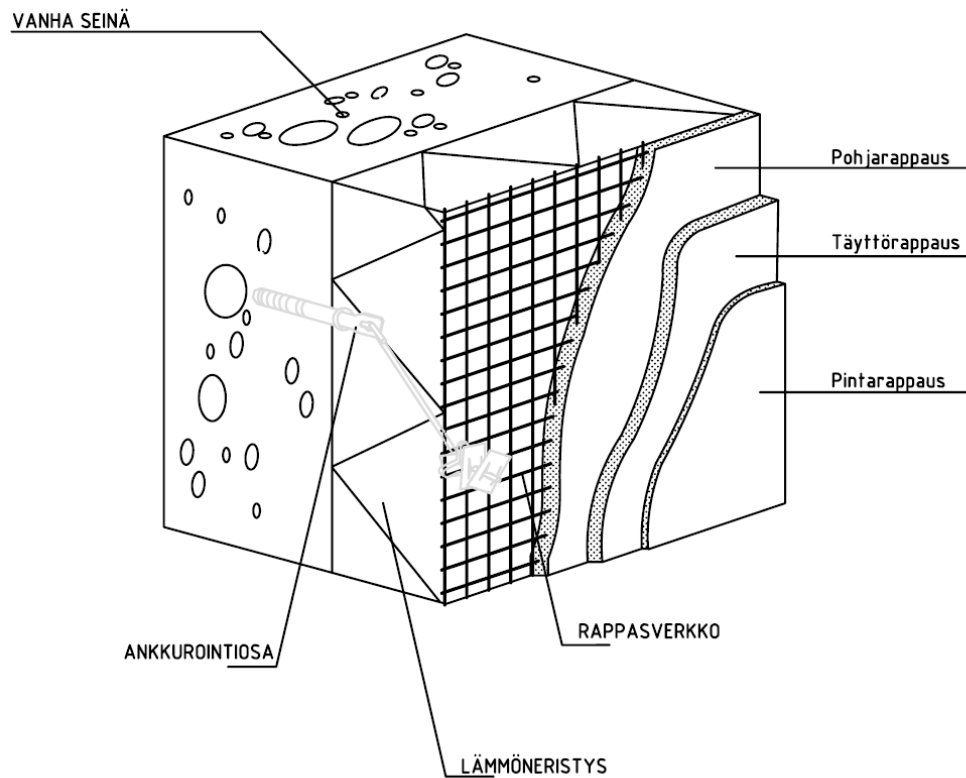
Ohutrapatun EPS-S-lämmöneristelevyn pintaan muodostuu välittömästi viistosateella vesikalvo, jolloin halkeamien ja muiden rappauspinnan epätiiviyksien kautta vesi voi kulkeutua eristekerrokseen. EPS-S-lämmöneriste ei ime vettä, jolloin vuotovesi ei siirry painovoimaisesti alaspäin. Saumakohdissa tämä on mahdollista. (6, s. 74.)

Kosteuden kuivuminen ohutrapatun EPS-S-lämmöneristyslevyn läpi on hidasta. Tämä täytyy huomioida lisälämmöneristykseen yhteydessä ja siksi vanha seinärakenne täytyy suojata kastumiselta asennustyön aikana. (6, s. 74.)

**Mineraalivillalla tehdyssä eristerappauksessa** käytetään rappauspintana epäorgaanisista laasteista tehtyä kaksi- tai kolmikerrosrappausta (kuva 5.) Rappauksen vahvistusverkkona käytetään kuumasinkittyä teräsverkkoa. Lämmöneristeenä käytetään jäykkää mineraalivillalevyä, joka kiinnitetään rakennusrunkoon tai vanhaan seinään mekaanisin kiinnikkein. Mineraalivillan vesihöyryn vastus on pieni, joten se ei aiheuta sisäpuolisen vesihöyryn ulospääsulle merkittävää estettä. Mineraalivillalla lisäeristetyin rakenteen alustana voi olla kivi-, puu- tai teräsrunkoinen ulkoseinärakenne. (6, s. 74.)

Kolmikerrosrappauksen paksuus on 20-30 mm. Paksu rappauseros imee runsaasti vettä. Vesisateella kolmikerrosrappauksen pintaan ei synny heti vesikalvoa, vaan kun rappauksen huokoset ovat täyttyneet vedellä. Halkeamista ja rappauksen epätiiviydestä kohdista voi tällöin kulkeutua vettä myös rappauksen taakse eristekerrokseen. Vesi voi liikkua lämmöneristekerroksessa painovoimaisesti alaspäin ja voi kuivua ulkopinnan läpi vetenä ja vesihöyrynä. Huonosti suunnitellun ja toteutetun kolmikerrosrappauksen halkeamien ja saumojen kautta voi vesi kyllästyä rappauspinnan ja siten vaurioittaa pinnoitetta. (6, s. 74-75.)

Mineraalivillan ja kolmikerrosrappauksen läpi mahdollinen kosteus pääsee kuivumaan suhteellisen nopeasti johtuen alhaisesta vesihöyryn tiiveydestä. Siitä huolimatta on syytä huolehtia ulkoseinärakenteiden työnaikaisesta suojauksesta. (6, s. 75.)



KUVA 5. Eristerappausrakenne, jossa on käytetty mineraalivillaa ja kolmikerrosrappaus (10)

## 2.2 BSW-elementin lämpötekniinen toiminta

Ulkoseinärakenteen lämpötekniiseen toimivuuteen vaikuttavat sekä sisäiset että ulkoiset tekijät. Sisäisiä tekijöitä ovat muun muassa käytettyjen rakennusaineiden lämmönjohtavuus, vesihöyryn- ja ilmanläpäisevyys ja muodonmuutosominaisuudet sekä niin sanotut rakenteelliset tekijät, kuten rakenne- ja liitosratkaisut, rakenteen osien mitat ja työn laatu. Ulkoisia tekijöitä ovat tuuli, ilmankosteus, lämpötila, rakennuksen painesuhteet sekä auringon säteily. (5, s. 41.)

Lämpötekniisen toiminnan tarkastelussa selvitetään lämpötilajakauma, rakenteen lämmönläpäisykerroin, rakenteen ilmatiiveys, estetään kylmäsiltojen sekä kosteuden kondensoituminen ja lämmöneristeen tuulensuojaus.

Lämmönläpäisy kerroin eli U-arvo lasketaan kaavalla 16 (11, s. 5).

$$U = 1/R_T$$

KAAVA 16

$R_T$  = rakennusosan kokonaislämmönvastus ( $\text{m}^2\text{K/W}$ )

Rakennuksen lämmönvastuksella tarkoitetaan rakennusosan tai rakenteen lämmönsiirtymisvastusta (2, s. 38).

Kun rakennusosan materiaalikerrokset ovat tasa-aineisia ja tasapaksuja ja lämpövirran suunta on kohtisuoraan rakennusosaan nähden, kokonaislämmönvastus lasketaan kaavalla 17 (11, s. 5).

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_g + R_b + R_{q1} + R_{q2} \dots R_{qn} + R_{se}$$

KAAVA 17

$$R_1 = d_1/\lambda_1, R_2 = d_2/\lambda_2 \dots R_n = d_n/\lambda_n$$

$d_1, d_2 \dots d_n$  = ainekerroksen 1, 2...n paksuus (m)

$\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_n$  = ainekerroksen 1, 2...n lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )

$R_g$  = rakennusosassa olevan ilmakerroksen lämmönvastus

$R_b$  = maan lämmönvastus

$R_{q1}, R_{q2} \dots R_{qn}$  = ohuen ainekerroksen 1, 2...n lämmönvastus

$R_{si}$  ja  $R_{se}$  = sisä- ja ulkopuolinen pintavastus

Rakenteessa olevien ansaiden otaksutaan lisäävän U-arvoa  $0,006 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , kun ansaat ovat ruostumattomasta teräksestä ja läpimitaltaan 4 mm. Tarkempia laskukaavoja kylmäsiltojen lämmönläpäisykertoimen lisäykseen löytyy lähteestä 11. (11, s. 6.)

**Lämpöä siirtyy rakenteessa tai tilassa johtumalla, säteilemällä tai konvektion avulla.** Lämmön siirtyminen on lämpöenergian siirtymistä eri lämpötiloissa olevien kappaleiden välillä. Lämmön siirtyminen tapahtuu lämpimämmästä kylmempään päin. (2, s. 37.)

Johtumisella siirtyvä lämpö siirtyy molekyyileissä olevana liike-energiana molekyylisestä toiseen. Lämpöä virtaa kylmemmästä lämpimämpään päin eli läm-

pö pyrkii tasoittumaan. Lämmön johtumista tapahtuu kiinteillä aineilla ja nesteillä. (2, s. 37.)

Säteilyssä energiaa siirtyy valon nopeudella sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä. Säteily ei vaadi väliainetta edetäkseen, kuten johtumalla tai virtauksen avulla tapahtuvat lämmönsiirtymiset. Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on suurempi kuin absoluuttisen nollapiste, lähettävät säteilyä eli emittoivat säteilyä. (2, s. 37.)

Säteilylämpöä esiintyy lyhytaaltoisena auringonsäteilynä ja pitkäaaltoisena kappaleiden säteilemänä lämpönä. Säteilyn osuessa johonkin pintaan tai kappaleeseen se osittain heijastuu siitä takaisin ja osittain imeytyy eli absorboituu. Lämpökameroiden toiminta perustuu lämpösäteilyyn. (2, s. 37.)

Virtauksessa eli konvektiossa lämpöä siirtyy nesteen tai kaasun virtauksen välityksellä. Konvektio voi olla luonnollista tai pakotettua. Luonnollisessa konvektiossa lämpötilaerojen aiheuttama tiheysero saa aikaan virtauksen. Pakotetussa konvektiossa lämpöä siirtyy kaasussa tai nesteessä ulkoisen voiman pakottamana, esimerkiksi tuulen tai ilmanvaihdon vaikutuksesta. (2, s. 37.)

## **2.3 Rakennusmateriaalit**

Rakennusmateriaalien lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet muuttuvat sen mukaan, mikä on materiaalia ympäröivät lämpötila ja suhteellinen kosteus. Varsinkin ulkoseinärakenteen ulkovaipan-osissa lämpö- ja kosteus olosuhteet vaihtelevat huomattavasti. Lämpimien rakennusten sisäosissa lämpötilan vaihtelut ovat hyvin pieniä eivätkä vaikuta sisäosien materiaaliominaisuuksiin, mutta materiaalien kosteustekniset ominaisuudet saattavat muuttua siinä määrin, että muutokset vaikuttavat rakenteen kosteustekniseen toimintaan. (3, s. 15.)

Luotettava rakenteiden rakennusfysikaalisen toiminnan tarkastelu edellyttää rakennusmateriaalien rakennusfysikaalisten ominaisuuksien tuntemista eri

lämpö- ja kosteus olosuhteissa. Kehittyneillä rakennusfysiikan tietokoneohjelmilla voidaan analysoida rakenteiden toimintaa eri vuoden aikoina ja ilmastolosuhteissa. (3, s. 15.)

Läheskään kaikille materiaaleille ei ole saatavilla rakennusfysikaalisia ominaisuuksia eri olosuhteissa. Materiaaliominaisuudet on pääsääntöisesti määritetty vain tietyissä olosuhteissa. Tämän vuoksi rakennusfysiikan tietokoneohjelmien käyttö on haastavaa ja osin epäluotettavaa puutteellisten materiaaliominaisuuksien vuoksi. (3, s. 15.)

### 3 TUTKITTAVAT ULKOSEINÄRAKENTEET

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan kolmea eri ulkoseinärakennetta. Rakennusfysikaaliset laskelmat suoritetaan vanhalle BSW-elementille (US1), mineraalivillalla ulkopuolelta lisäeristetylle seinärakenteelle (US2) ja EPS-S-polystyreeni eristeellä ulkopuolelta lisäeristetylle seinärakenteelle (US3).

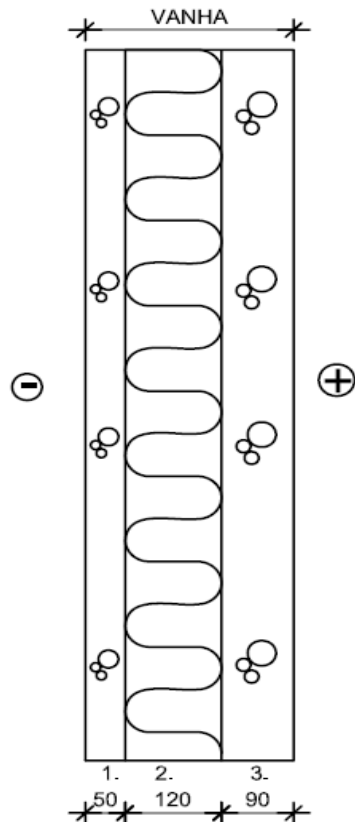
Lisäeristykset asennetaan vanhan ulkoseinärakenteen päälle. Tässä opinnäytetyössä oletetaan, että vanhalle ulkoseinärakenteelle on tehty kuntotutkimus, jossa on todettu vanhan ulkoseinärakenteen soveltuvan sellaisenaan uuden lisälämmöneristeen alustaksi riippumatta eriste materiaalista.

Lisäeristetyt rakenteet täyttävät vuoden 2010 ulkoseinälle asetetun U-arvo- vaatimuksen  $0,17 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ . U-arvot on laskettu SrakMK C4:n mukaan.

#### 3.1 US1, vanha rakenne

Asuinkerrostalon pitkällä julkisivuilla oleva BSW-elementti koostuu 50 mm vahvasta harjatusta betonisesta ulkokuoresta, 120 mm vahvasta mineraalivillaeeristeestä sekä 90 mm vahvasta sisäkuoresta (kuva 6). Rakenneleikkauksissa sisäkuoren vahvuudeksi on annettu 80 mm. Lämpö- ja kosteuslaskennoissa antureiden asennuksen yhteydessä käytetään mittauskohdasta mittaamamme sisäkuoren paksuutta, joka on 90 mm. BSW-elementissä ei ole tuuletusuria. Vanhan ulkoseinärakenteen U-arvo on  $0,38 \text{ W/m}^2\text{K}$ .



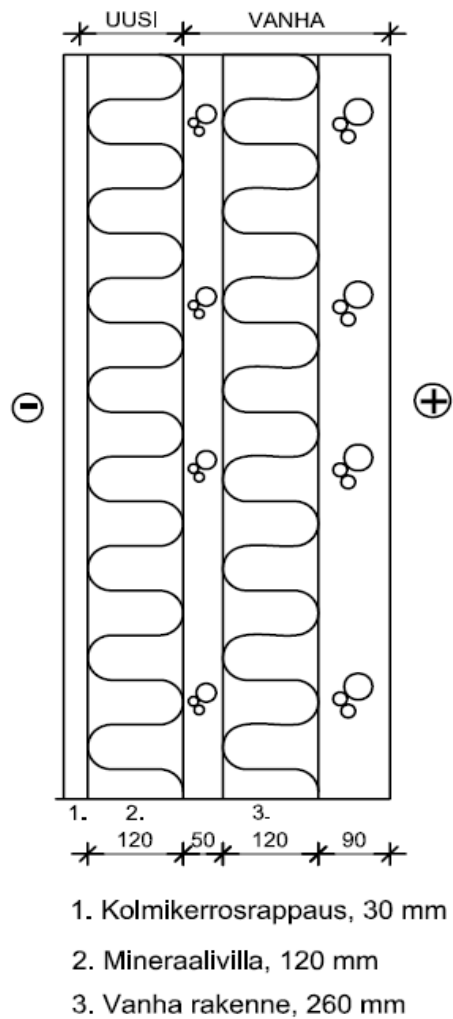


1. Betoninen ulkokuori, 50 mm
2. Lämmöneriste, 120 mm
3. Betoninen sisäkuori, 90 mm

KUVA 6. Vanha BSW-elementti US1

### 3.2 US2, mineraalivillalla lisäeristetty rakenne

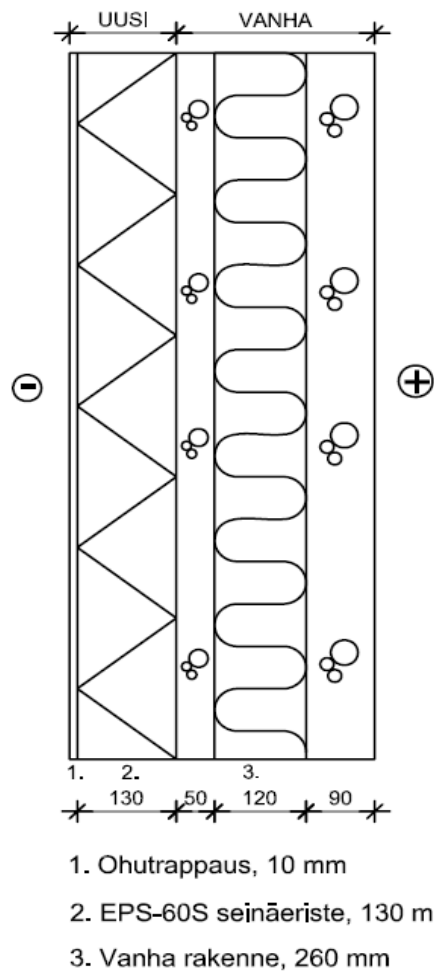
US2-ulkoseinärakenne koostuu vanhasta rakenteesta (US1), jonka ulkopintaan on asennettu mineraalivillalämmöneriste (kuva 7). Lämmöneristeen pintaan tehdään kolmikerrosrappaus valmistajan ohjeiden mukaisesti. Nykyiset lämmöneristemääräyksen vaatimukset saavutetaan, kun lisäeristeen paksuus on 120 mm (Paroc FAS 1  $\lambda=0,035$  W/mK). US2-ulkoseinärakenteen U-arvo lisäeristämisen jälkeen on 0,17 W/(m<sup>2</sup>K).



KUVA 7. Periaatekuva US2-ulkoseinärakenteen lisäeristämisestä

### 3.3 US3, EPS-S-polystyreenillä lisäeristetty rakenne

US3-ulkoseinärakenne koostuu vanhasta rakenteesta (US1) ja sen ulkopintaan asennetusta EPS-S-eristeestä (kuva 8). Lisälämmöneristeen paksuudeksi valitaan 130 mm (EPS-60S  $\lambda=0,039$  W/mK). US3-ulkoseinärakenteen U-arvo lisäeristämisen jälkeen on 0,17 W/(m<sup>2</sup>K).



KUVA 8. Periaatekuva US3-ulkoseinärakenteen lisäeristämisestä

## 4 AS OY KAIJONHAKA

Opinnäytetyössä tutkittava asuinkerrostalo (kuva 9) sijaitsee Oulussa, Kaijonharjussa. Kyseinen asuinkerrostalo on rakennettu 1970-luvulla. Asuinkerrostalossa on neljä kerrosta, joista maantasossa olevassa kerroksessa on huoneistovarastoja, huoneistoja sekä väestönsuoja. Ylemmät kerrokset ovat asuinhuoneistoja. Asuinkerrostalo on tasakattoinen.

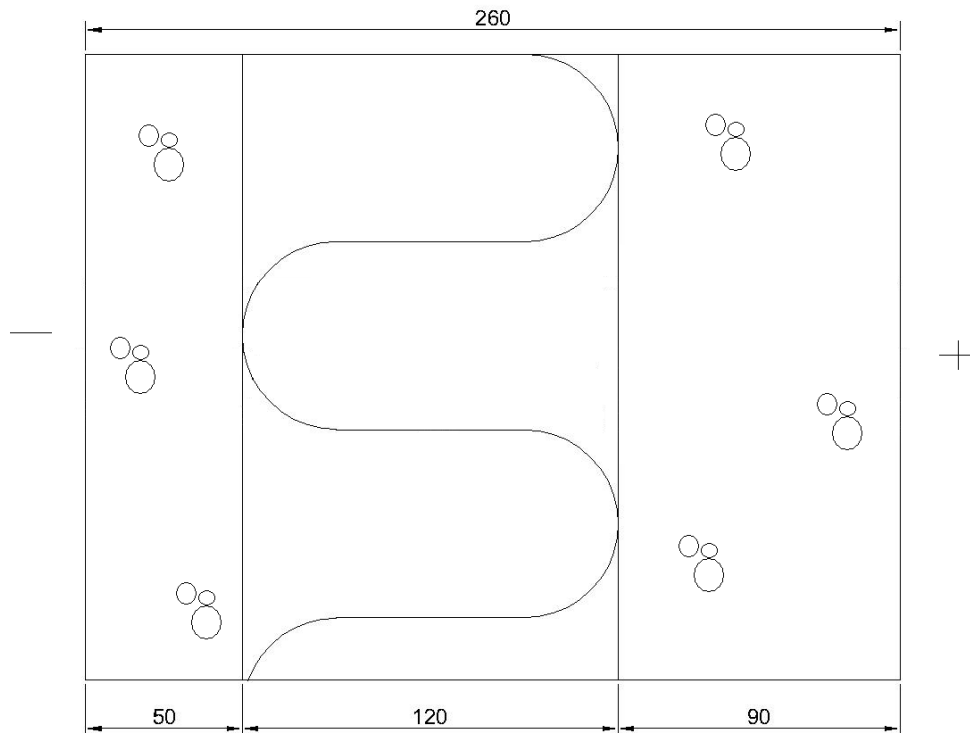


*KUVA 9. Mittauskohde AS Oy Kaijonhaka*

Rakennuksen päädyt ovat kantavia BSW-elementtejä. Rakennuksen pitkät sivut ovat ei-kantavia BSW-elementtejä, joiden pinta on harjattu. BSW-elementtien pinnoitteena on Kenitex-pinnoite.

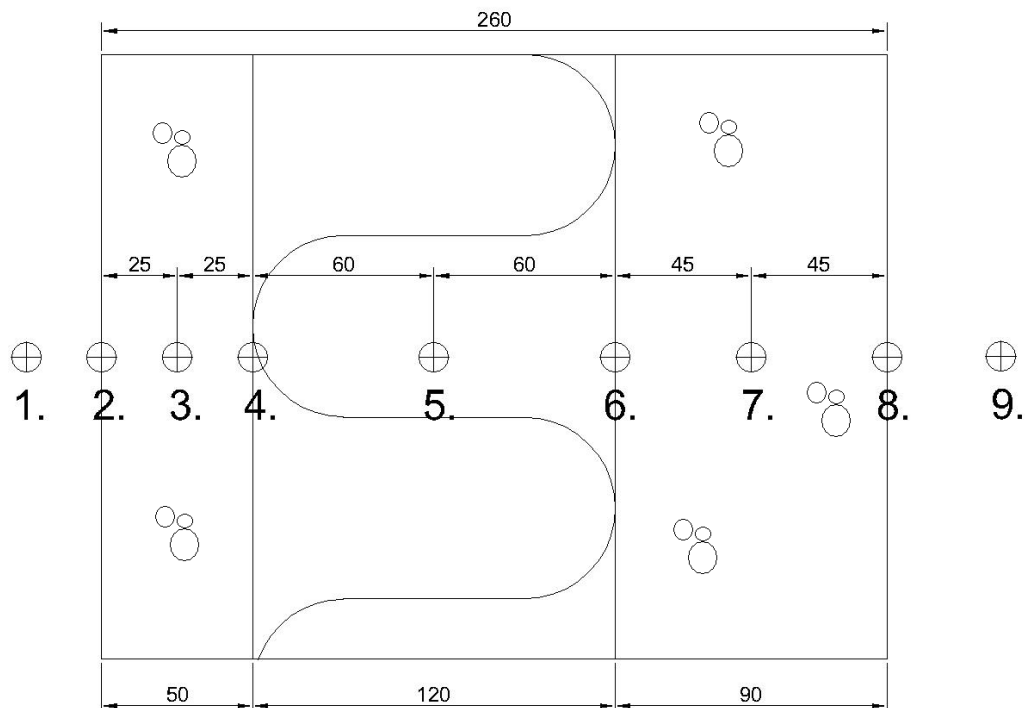
Asuinkerrostalon suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mittaukset suoritettiin itä-julkisivulla, kuvassa 9 näkyvällä pitkällä julkisivulla. Tutkittavan julkisivun

ulkokuori on 50 mm, lämmöneristekerros on 120 mm ja sisäkuoren vahvuus on 90 mm (kuva 10).



KUVA 10. BSW-elementin poikkileikkaus, jossa mittaukset suoritetaan

Tutkittavalle BSW-elementille suoritettiin **suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mittaukset**. Suhteellinen kosteus- ja lämpötila-anturit asennettiin kuvan 11 osoittamiin BSW-elementin kohtiin.



KUVA 11. Tutkittavaan julkisivuun asennettujen RH- ja T- antureiden sijainnit

Antureiden asennus suoritettiin seuraavasti:

1. Peitelistat ja polyuretaanit poistettiin ikkunan ympäriltä.
2. Ikkuna irrotettiin.
3. Suhteellinen kosteus- ja lämpötila-anturit asennettiin BSW-elementin sivusta noin 25 cm syvyydelle ikkunan reunasta.
4. Mittausten jälkeen ikkuna asennettiin takaisin paikoilleen ja polyuretaanit vaahdotettiin ikkunankarmin ja BSW-elementin väliin. Ulkopuolelta huolehdittiin silikonitiivistykset kuntoon.

Mittauslaitteistoon (kuva 12) kuuluivat suhteellisen kosteuden anturit HIH-4021-003, lämpötila-anturit Termistor UU, Grant 2040 -tiedonkeruulaite ja mittauslaitteiston virtalähteenä oleva sotilasakku. HIH-4021-003-kosteusantureiden virhemarginaali on  $\pm 5$  %, kun lämpötila on alle  $0^{\circ}\text{C}$ :n.

Termistor UU -lämpötila-antureiden virhemarginaali on  $\pm 0,2$  °C koko mittausalueella.

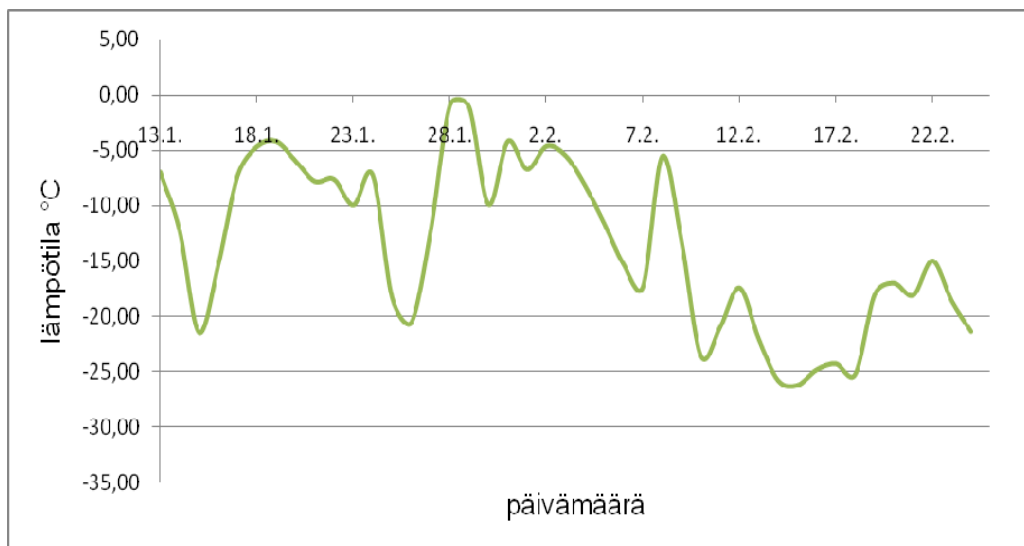


KUVA 12. Mittauslaitteisto

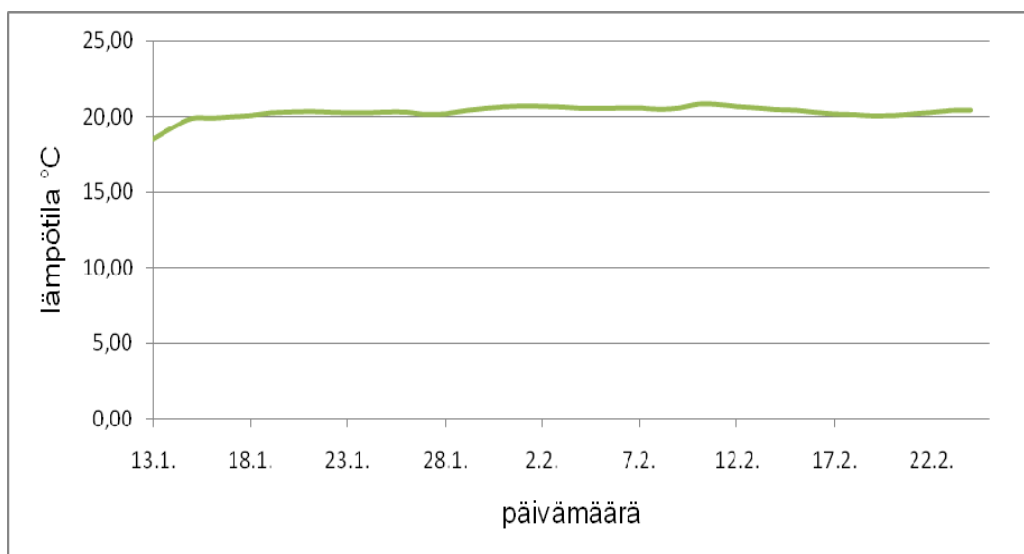
Mittauslaitteisto asennettiin kohteeseen 12.1.2011. Varsinaiset mittaukset aloitettiin 16.1.2011, joten antureiden annettiin tasaantua neljä päivää. Mittaukset kestivät 23.2.2011 saakka.

Mittauslaitteisto tallensi eri mittauspisteissä vallitsevat lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot tunnin välein.

Mittausaikana ulkoilman vuorokauden keskilämpötila vaihteli +0 °C:sta -32 °C:seen (kuva 13). Sisäilman lämpötila pysytteli noin +20 °C:ssa (kuva 14).



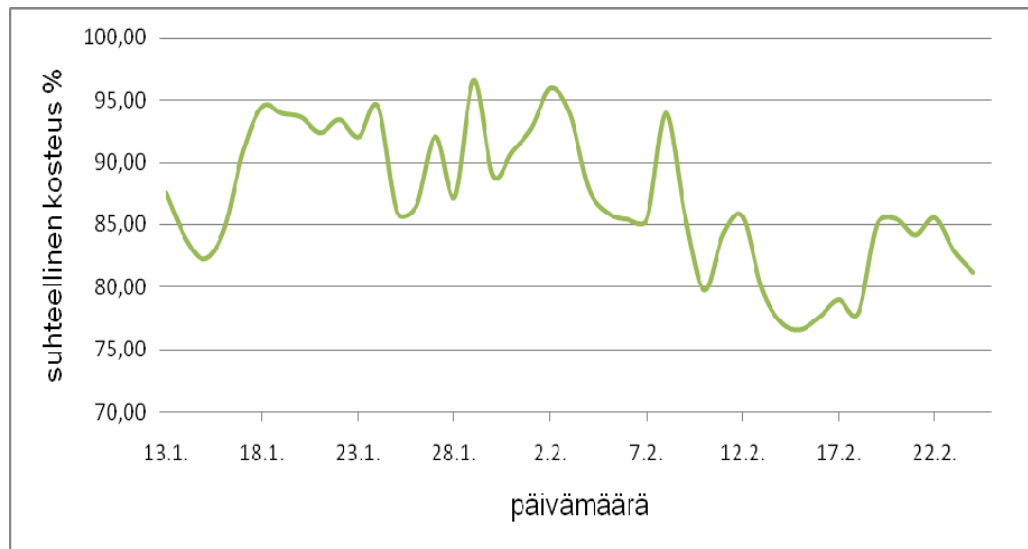
KUVA 13. Ulkoilman lämpötilan vaihtelu mittausaikana



KUVA 14. Sisäilman lämpötilan vaihtelu mittausaikana

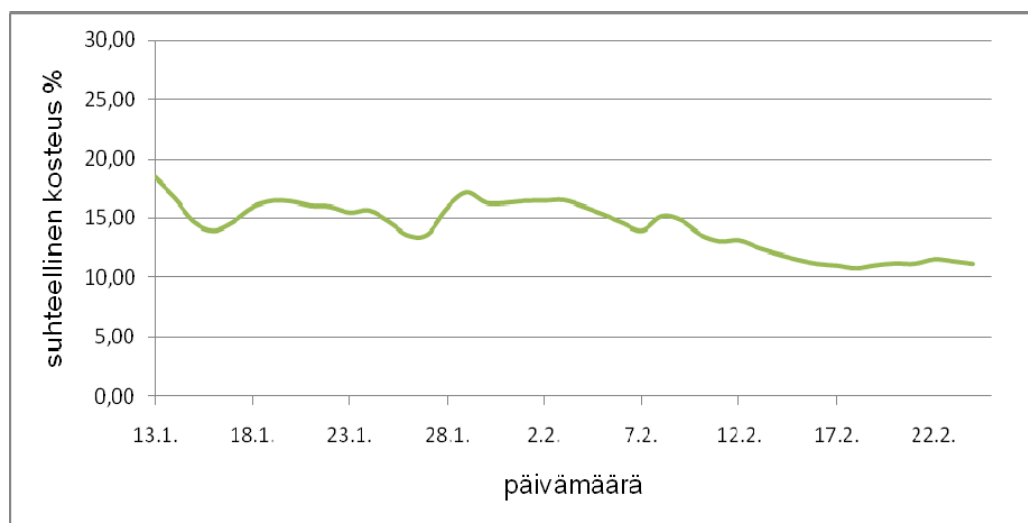
Ulkoilman suhteellisen kosteuden arvot (kuva 15) haettiin Freemeteo.com-sääpalvelusta johtuen mitattujen ulkoilman suhteellisten kosteuden arvojen epätodellisista mittaustuloksista. Suhteellisen kosteuden vuorokauden keskiarvot vaihtelivat 77 %:sta 100 %:iin mittausjakson aikana.





KUVA 15. Ulkoilman suhteellisen kosteuden vaihtelu mittausaikana

Sisäilman suhteellisen kosteuden arvot (kuva 16) olivat hyvin matalat, koska huoneistovarastossa ei ole merkittäviä kosteuslähteitä. Suhteellisen kosteuden vuorokauden keskiarvot vaihtelivat mittausjaksolla 11 %:sta 18 %:iin.



KUVA 16. Sisäilman suhteellisen kosteuden vaihtelu mittausaikana

## 5 LÄMPÖ- JA KOSTEUSLASKELMAT

Valituille ulkoseinärakenteille suoritettiin lämpö- ja kosteyslaskelmia COMSOL Multiphysics- ja WUFI Pro 5.0 -ohjelmilla.

US1-ulkoseinärakenteelle suoritettiin lämpö- ja kosteyslaskelmia molemmilla ohjelmilla Itä-julkisivulla, koska mittauspiste sijaitsi kyseisellä julkisivulla. Tietokoneohjelmilla saatuja tuloksia verrattiin mittaustuloksiin.

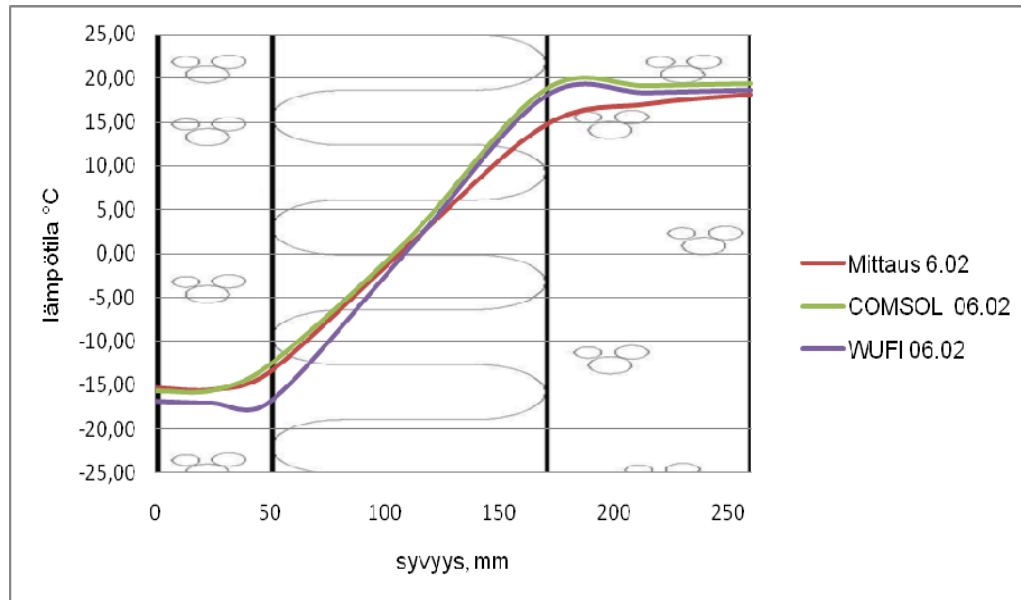
US2- ja US3-ulkoseinärakenteiden osalta keskityttiin tarkastelemaan EPS-S- ja mineraalivillaeristeen toimivuutta Oulun olosuhteissa. Lämpö- ja kosteusteknisten vertailun helpottamiseksi laskettiin molemmat rakenteet samalla vahvuudella WUFI-ohjelman tietokannasta saaduilla materiaalien arvoilla. US2- ja US3-ulkoseinärakenteille suoritettiin lämpö- ja kosteyslaskelmia ainoastaan WUFI-ohjelmalla johtuen COMSOL-ohjelman korkeiden suhteellisen kosteusarvojen laskentaongelmista. Tämän vuoksi COMSOL-ohjelmalla ei saatu laskettua luotettavia tuloksia lisäeristettyjen rakenteiden osalta. US2- ja US3-ulkoseinärakenteiden osalta suoritettiin lämpö- ja kosteustekninen toimivuus rasitetuimmalla julkisivulla eli etelä-julkisivulla. Ulkoilman sää-tiedot haettiin METEONORM-sääpalvelusta kohteelle Oulu.

### 5.1 US1 lämpö- ja kosteyslaskelmien tulokset ja niiden vertailu mittaustuloksiin

Ulkoseinärakennetta US1 tarkasteltiin koko rakenteena sekä jokaisessa mittauspisteessä erikseen.

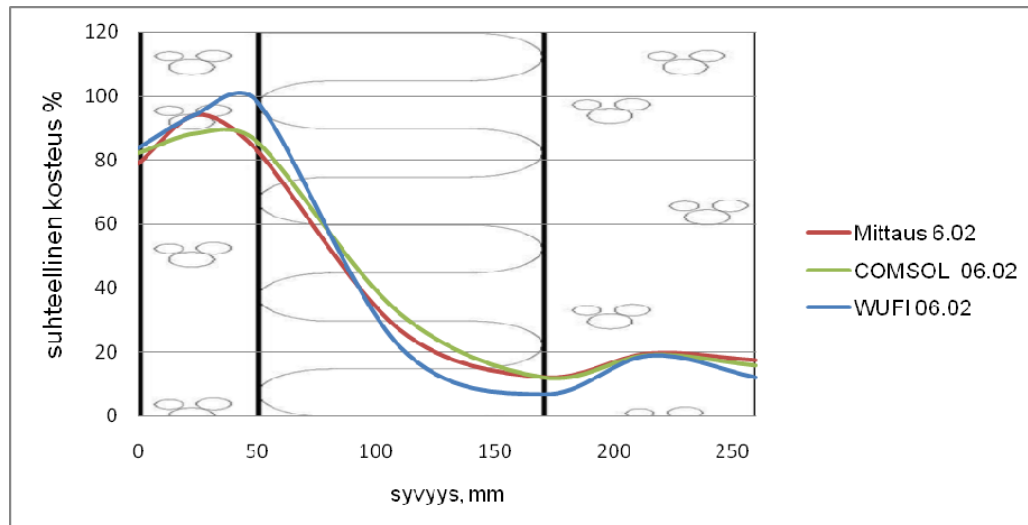
Lämpötilajakauma rakenteessa 6.2.2011 kello 10.20 (kuva 17) on lämpölaskelmien ja mittaustulosten osalta hyvin yhtenevä. Erityisesti rakenteen lämpimällä osalla WUFI- ja COMSOL-ohjelman laskemat tulokset ja mittaustulokset ovat lähellä toisiaan. Eristeen ja betonin rajapinnassa on hiukan eroja,

jotka johtunevat asennusteknisistä virheistä eli todellisuudessa anturit eivät ole aivan betonin ja lämmöneristeen rajapinnassa, vaan 5-15 mm:n päässä siitä. WUFI-tulokset alkavat erkaantua hiukan mittaustulosten ja COMSOL-tulosten linjasta, kun lämpötila laskee alle 0 °C:n.



KUVA 17. Lämpötilajakauma rakenteessa 6.2. kello 10.20

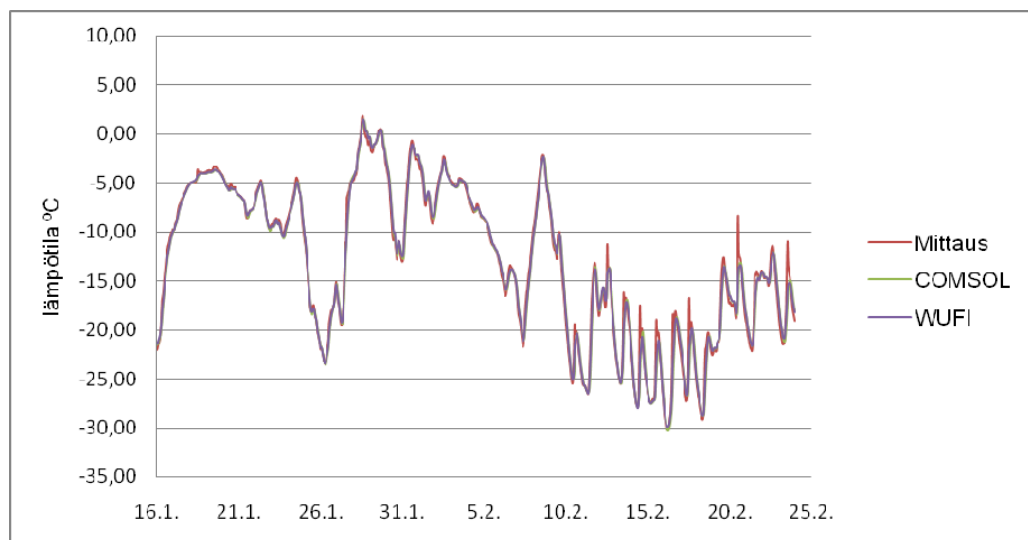
Ulkoseinärakenteen suhteelliset kosteudet (kuva 18) ovat hyvin lähellä toisiaan lämmöneristeen ja BSW-elementin sisäkuoren osalta. Lämmöneristeen ulkopinnassa ja BSW-elementin ulkokuoressa, jossa suhteellisen kosteuden arvot ovat korkeita ja lämpötila matalia, esiintyy eroa mittaus tulosten ja WUFI-laskelmien osalta. Suhteellisen kosteuden arvoja analysoidaan tarkemmin jokaisessa mittauspisteissä myöhemmin.



KUVA 18. Suhteellisen kosteuden jakauma rakenteessa 6.2. kello 10.20

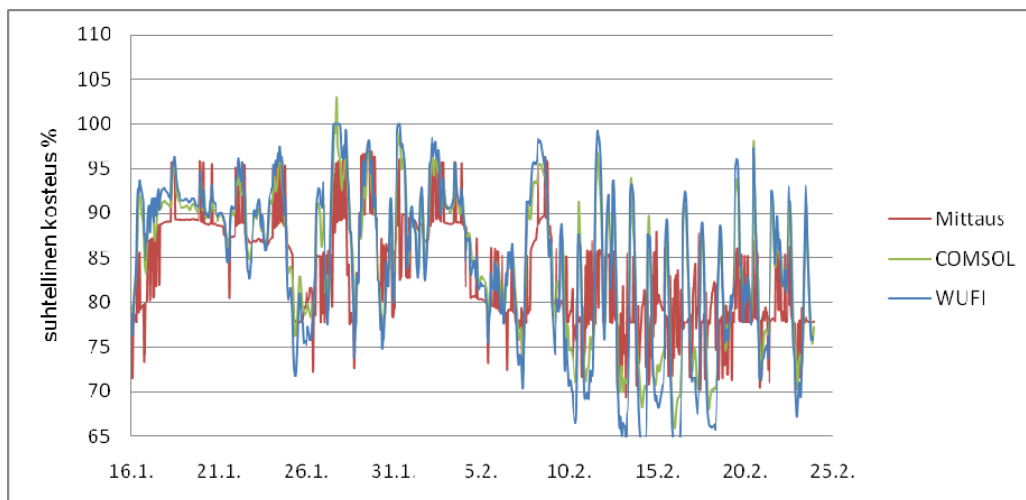
Seuraavassa osiossa on koottu kuvaajiin mittauspisteittäin ulkoseinärakenteen US1 lämpö- ja suhteellisen kosteuden vaihtelut mittausjaksolla jokaisessa mittauspisteessä. Mittausarvot, COMSOL- ja WUFI-ohjelmien arvot ovat kuvaajissa tunnin välein.

**Mittauspiste 2** sijaitsee BSW-elementin ulkokuoren pinnassa. Kuvan 19 kuvaajassa on mittauspisteen 2 lämpötila mittausjakson aikana. WUFI- ja COMSOL-ohjelmien tulokset ovat yhtenevät mittaustulosten kanssa mittauspisteessä 2.



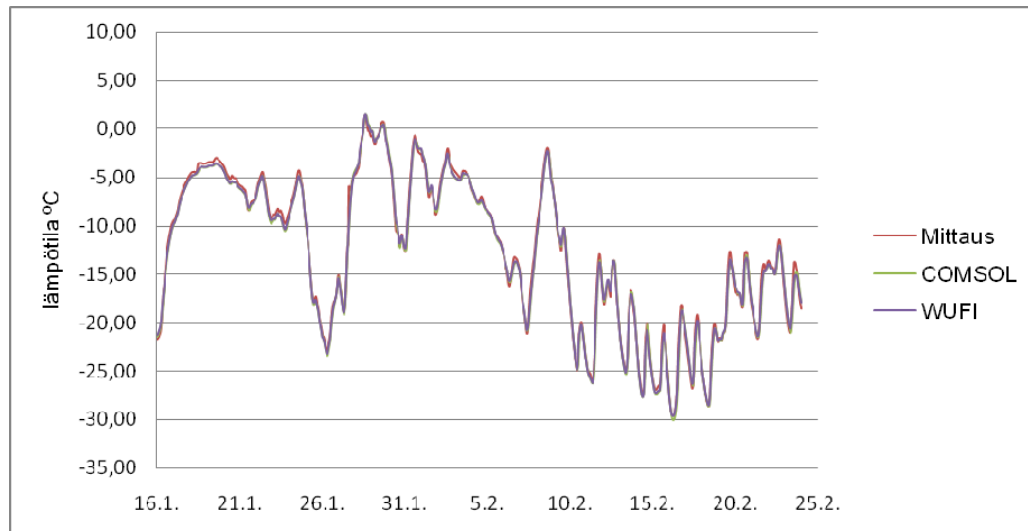
KUVA 19. Lämpötilan vaihtelu ulkokuoren pinnassa (mittauspiste 2)

COMSOL- ja WUFI-ohjelmien sekä mittaustulosten suhteellisen kosteuden kuvaajat ovat mittauspisteessä 2 yhtenevät (kuva 20). Tuloksista havaitaan, että helmikuussa WUFI-käyrässä on hiukan suurempia huippuja. Ulkopinnan lämmönvastuskertoimen muuttamisella on vaikutusta myös suhteellisen kosteuden kuvaajaan. Mitä pienempi on ulkopinnan lämmönvastus, sitä suurempi on ulkopinnan suhteellinen kosteus. Kosteuslaskelmissa käytetyt ulkoilman suhteellisen kosteuden arvot haettiin sääpalveluita tarjoavan yrityksen internet sivuilta kohteelle Oulu. Mittaustulosten suhteellinen kosteus laskettiin käsinlaskentamenetelmällä ulkoilman suhteellisen kosteuden arvoista. FREEMETO-sääpalvelusta haettujen ulkoilman suhteellisten kosteuksien arvojen pohjalta laskettiin rakenteen pinnassa vaikuttava suhteellinen kosteus.



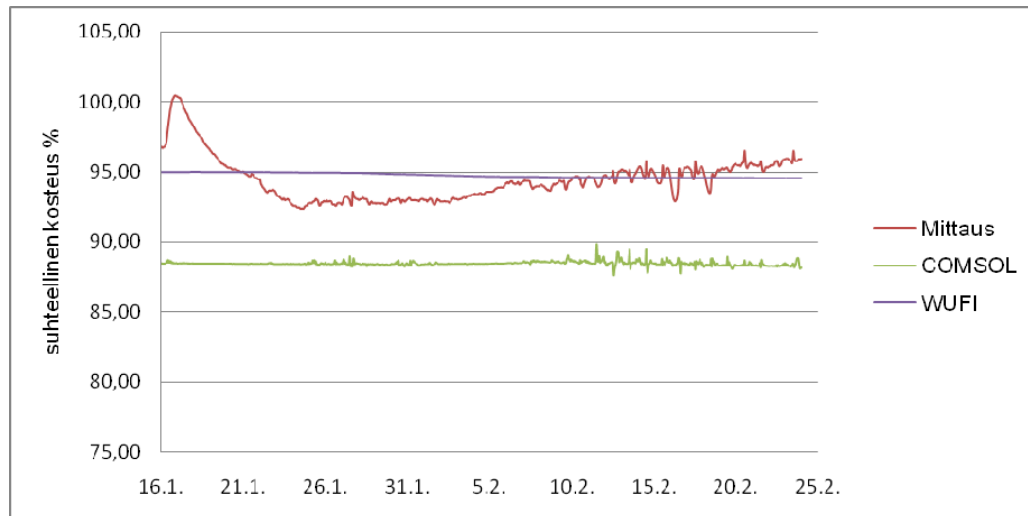
KUVA 20. Suhteellisen kosteuden vaihtelu ulkokuoren pinnassa (mittauspiste 2)

**Mittauspiste 3** sijaitsee BSW-elementin ulkokuoren keskellä eli 25 mm ulkopinnasta. WUFI- ja COMSOL-ohjelmien tulokset ovat yhtenevät mittaustulosten kanssa mittauspisteessä 3 (kuva 21).



KUVA 21. Lämpötilan vaihtelu 25 mm:n päässä ulkokuoren ulkopinnasta (mittauspiste 3)

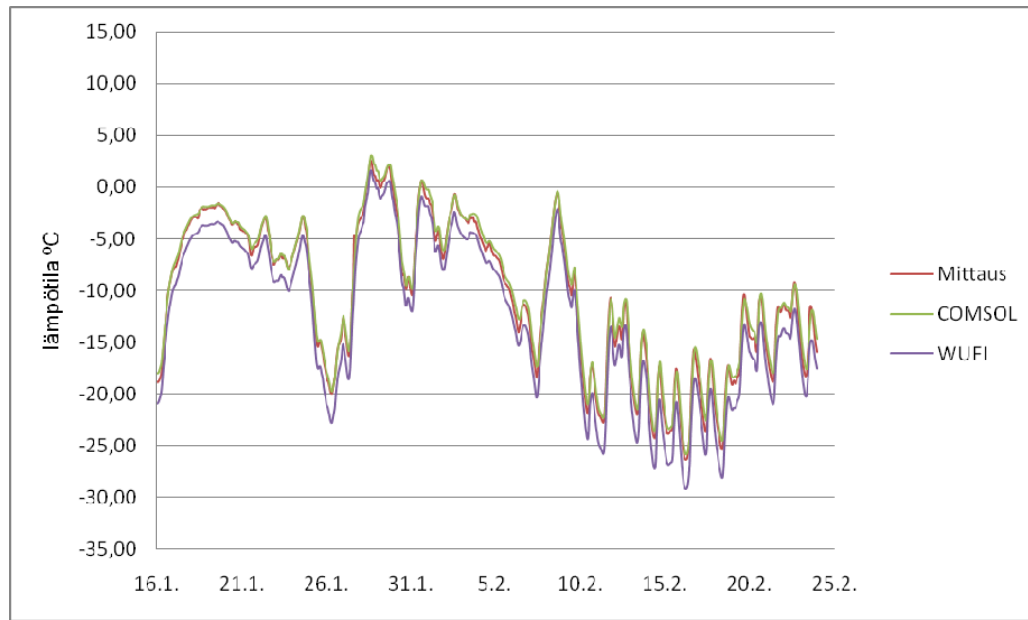
Suhteellisen kosteuden kuvaajassa (kuva 22) on mittaustuloksissa ja tietokone-ohjelmilla lasketuissa tuloksissa hiukan eroa. Anturat asennettiin BSW-elementtiin 12.1.2011 ja mittausjakso alkoi 13.1.2011. Betonin kosteuden mittausohjeiden mukaan suhteellisen kosteuden anturin tulee antaa tasaantua rakenteessa 3-7 vrk ennen kuin voidaan luotettavasti mitata suhteellisen kosteuden arvoja (12, s. 3). Kuvaajiin otettiin suhteellisen kosteuden arvoja 16.1.2011 alkaen. Kun kuvaajaa tarkastellaan 16.1.2011 alkaen, suhteellisen kosteuden arvot COMSOL-ohjelmalla ovat noin 90 %, WUFI-ohjelmalla noin 95 % ja mittausarvot noin 95 %. WUFI-ohjelman suhteellisen kosteuden kuvaaja on likipitään suora. Kosteusantureiden valmistajan mukaan mittausantureiden virhemarginaali on  $\pm 5$  %, joten tietokoneohjelmien laskemien suhteellisen kosteuden arvot ovat mittausvirhemarginaalin sisällä.



KUVA 22. Suhteellisen kosteuden vaihtelu 25 mm:n päässä ulkokuoren ulkopinnasta (mittauspiste 3)

**Mittauspiste 4** sijaitsee BSW-elementin ulkokuoren sisäpinnassa eli 50 mm ulkopinnasta. WUFI- ja COMSOL-ohjelmien lämpötilakäyrät ovat yhtenevät mittaustulosten kanssa mittauspisteessä 4 (kuva 23).

Suurimmat erot ovat kovien pakkasten aikaan, jolloin lämpötilaero on noin 5 °C suurimmillaan. Mittausvirhemarginaali lämpötila antureiden osalta on  $\pm 0,2$  °C. Mittausvirhettä kasvattaa lisäksi se, että mittausanturi ei ole 50 mm:n päässä ulkokuoresta, vaan todellisuudessa se on noin 55-60 mm ja jonkin verran eristeeseen kosketuksissa. Tämän vuoksi mittaustulokset ovat hiukan lämpimämpiä verrattuna COMSOL-ohjelman antamiin arvoihin.



KUVA 23. Lämpötilan vaihtelu 50 mm:n päässä ulkokuoren ulkopinnasta (mittauspiste 4)

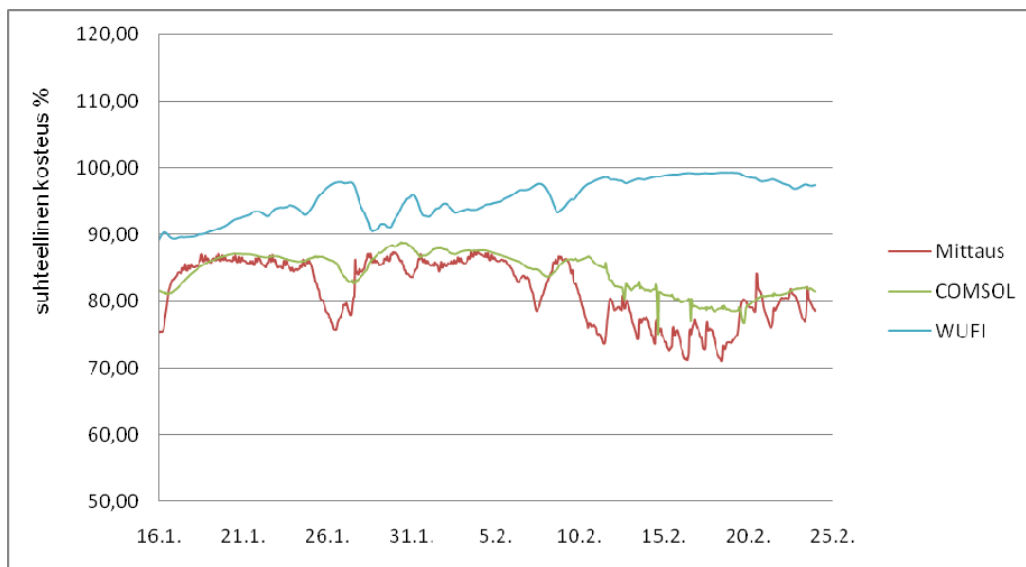
BSW-elementin kriittisin kohta kosteuden tiivistymisen kannalta on mittauspisteessä 4. Suhteellisen kosteuden arvot ovat mittaustulosten ja COMSOL-ohjelman osalta lähellä toisiaan. WUFI-laskentatulokset eroavat mittaustuloksista mittausjakson alkuaikoina noin 5-10 %, kun kovien pakkasten aikaan helmikuussa on tuloksissa eroa 10-25 %.

Mittausten jälkeen kalibroitiin useita suhteellisen kosteuden antureita, mukaan lukien mittauspisteessä 4 sijaitsevan anturin. Mittauspisteen 4 suhteellisen kosteuden anturi näytti 97,7 %:n vertailukosteudessa 98,5 %, joten mittaasanturin virhemarginaali on hyvin pieni mittauspisteessä 4. Lämpötilalla on huomattava vaikutus mittaustulokset tarkkuuteen, kuten mittauspisteen 4 lämpötilan käyriä ja suhteellisen kosteuden käyriä vertailemalla havaitaan. Suurimmat erot mittaustulosten ja WUFI-laskentojen välillä ovat syntyneet korkeiden pakkasten aikaan eli noin 10. helmikuuta alkaen, kun lauhemmilla ilmoilla WUFI- ja mittaustulosten ero on noin 5 %. Ja vielä esimerkiksi, kun katsotaan 26.1. olevia WUFI- ja mittaustulosten arvoja noin -20 °C:n pakkaskelillä, suhteellisen kosteuden arvot eroavat jo noin 20 %.



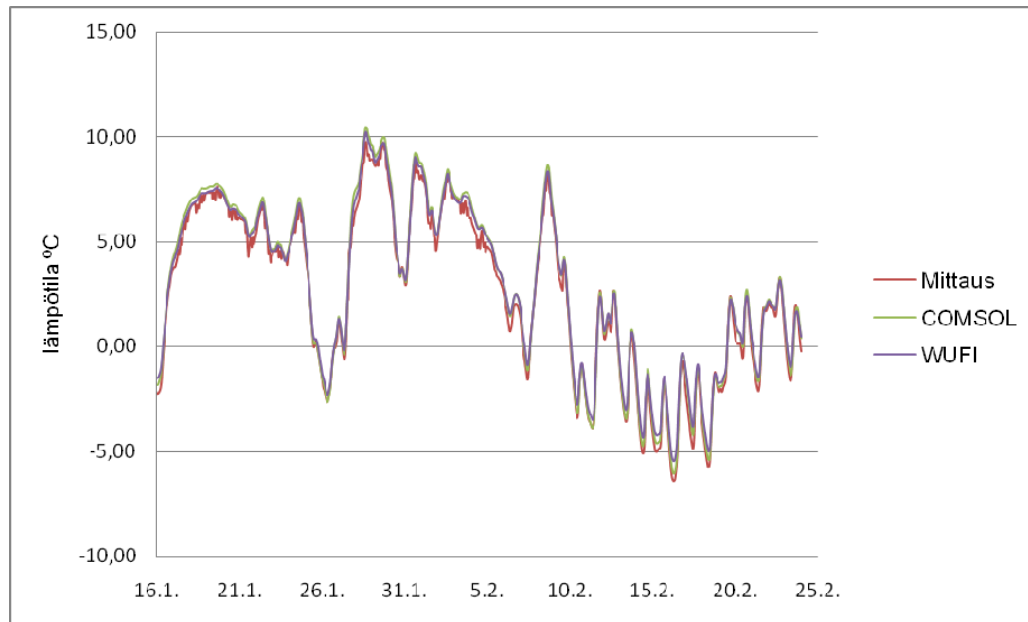
Mittausteknisistä seikoista johtuen anturi sijaitsee todellisuudessa noin 55-65 mm ulkokuoren ulkopinnasta eikä 50 mm:n päässä niin kuin tietokoneohjelmien laskelmissa laskettiin. Todellisuudessa suhteellinen kosteus olisi siten hiukan suurempi kuin on laskettu.

Mittaustulosten ja tietokoneohjelmien laskemat tulokset ovat pienillä pakkasilla ja lämpimillä ilmoilla mittausvirhemarginaalin sisällä. Valmistaja antaa kosteusantereiden mittausvirhemarginaaliksi  $\pm 5$  %, kun lämpötila on alle nolla astetta.



KUVA 24. Suhteellisen kosteuden vaihtelu 50 mm:n päässä ulkokuoren ulkopinnasta (mittauspiste 4)

**Mittauspiste 5** sijaitsee BSW-elementin eristekerroksen keskellä eli 110 mm ulkopinnasta. WUFI- ja COMSOL-ohjelmien lämpötiläkäyrät ovat yhtenevät mittau tulosten kanssa mittauspisteessä 5 (kuva 25).

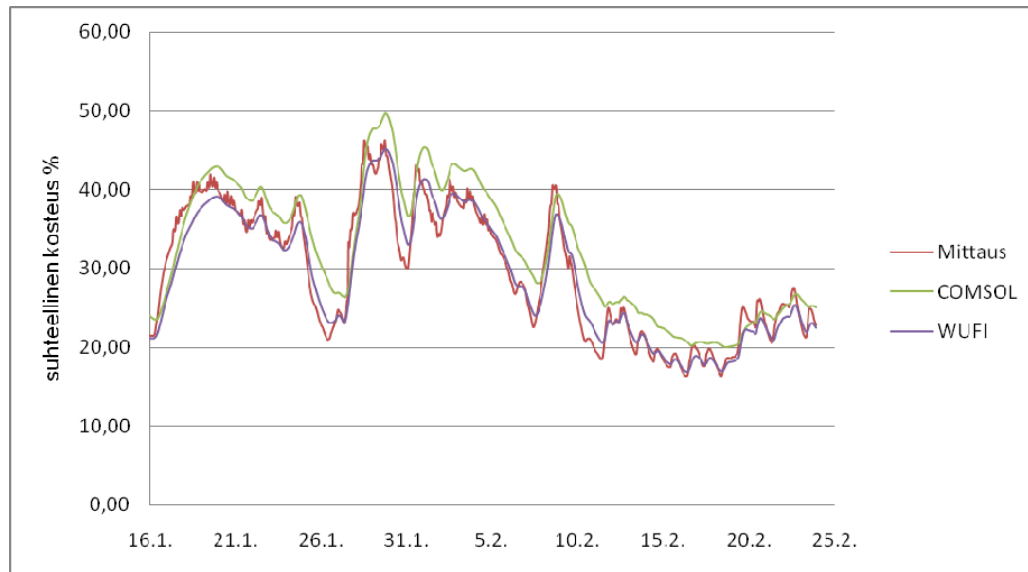


KUVA 25. Lämpötilan vaihtelu 110 mm:n päässä ulkokuoren ulkopinnasta (mittauspiste 5)

WUFI- ja COMSOL-ohjelmien suhteellisen kosteuden käyrät ovat hyvin yhtenevät mittaustulosten kanssa mittauspisteessä 5 (kuva 26). COMSOL-tulokset ovat suurimmillaan noin 7 % suuremmat kuin mittaustulosten antamat arvot. WUFI-tulokset ovat noin  $\pm 2$  %:n sisällä mittaustuloksista.

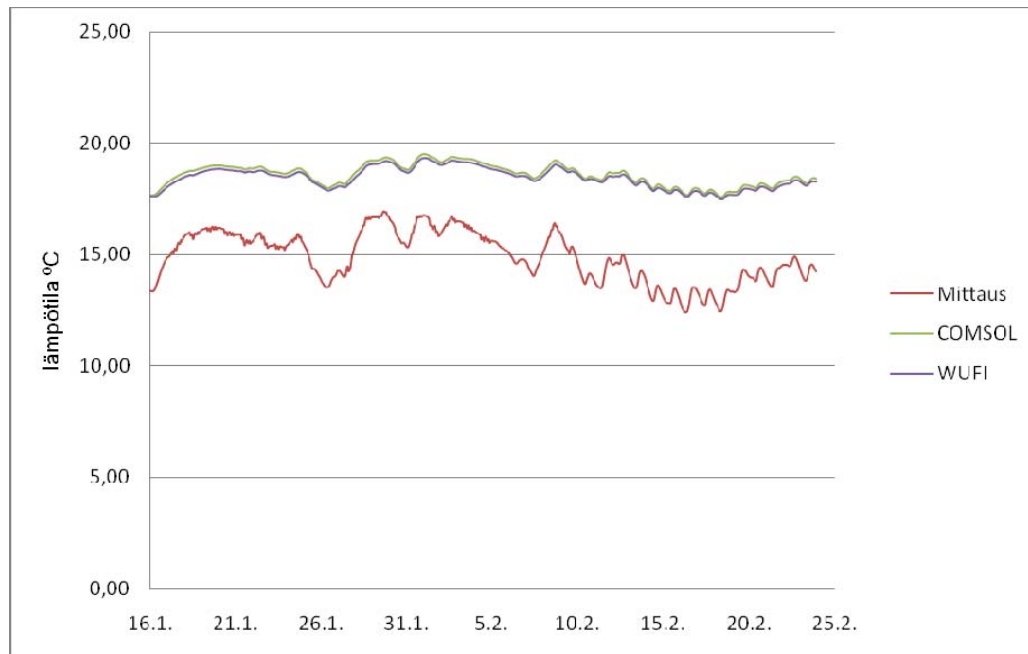
Valmistaja antaa kosteusantureiden mittausvirhemarginaaliksi  $\pm 3,5$  %, kun lämpötila on yli nolla astetta. WUFI-tulokset ovat mittausvirhemarginaalin sisällä. COMSOL-tulokset ovat pääsääntöisesti mittausvirhemarginaalin sisällä lukuunottamatta muutamia piikkejä käyrässä.

On syytä myös huomata, että mittausteknisistä syistä johtuen ei tarkalleen tiedetä, ovatko anturit olleet juuri 110 mm ulkokuoren pinnasta vai vähemmän.



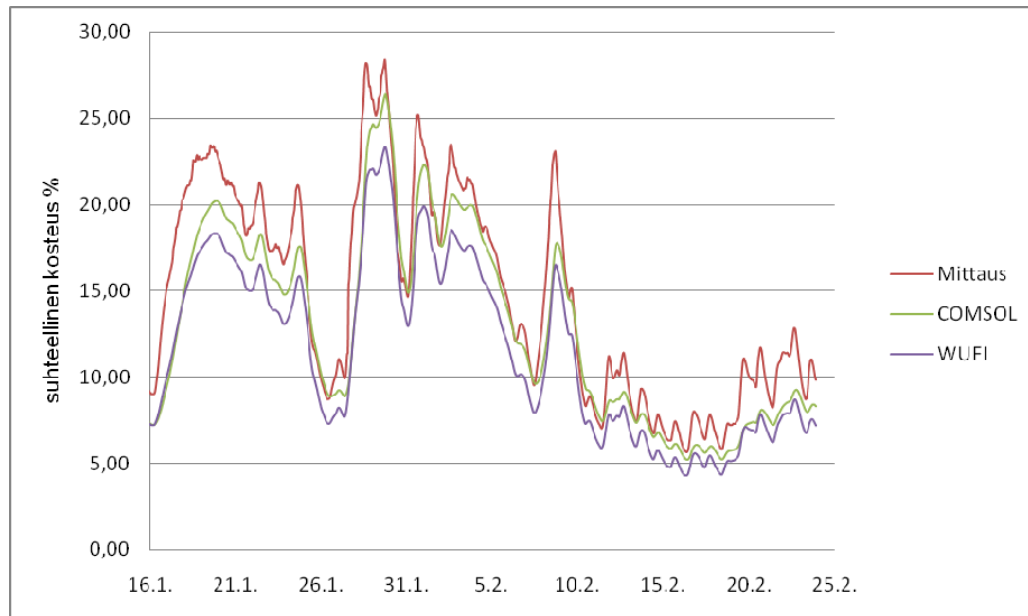
KUVA 26. Suhteellisen kosteuden vaihtelu 110 mm:n päässä ulkokuoren ulkopinnasta (mittauspiste 5)

**Mittauspiste 6** sijaitsee BSW-elementin eristekerroksen sisäpinnassa eli 170 mm ulkopinnasta. WUFI- ja COMSOL-ohjelmien lämpötilakäyrät ovat muodoiltaan yhtenevät mittaustulosten kanssa mittauspisteessä 5, mutta tietokoneohjelmien antamat tulokset ovat noin 3 °C suuremmat (kuva 27). Suurimmat erot ovat kovien pakkasten aikaan, jolloin lämpötilaero on noin 5 °C suurimmillaan. Mittausvirhemarginaali lämpötila-antureiden osalta on  $\pm 0,2$  °C. Mittausvirhettä kasvattaa lisäksi se, että mittausanturi ei ole 170 mm ulkokuoren pinnasta, vaan todellisuudessa se on noin 155-165 mm ja jonkin verran eristeeseen kosketuksissa. Tämän vuoksi mittaustulokset ovat hiukan lämpimämpiä verrattuna tietokoneohjelman antamiin arvoihin.



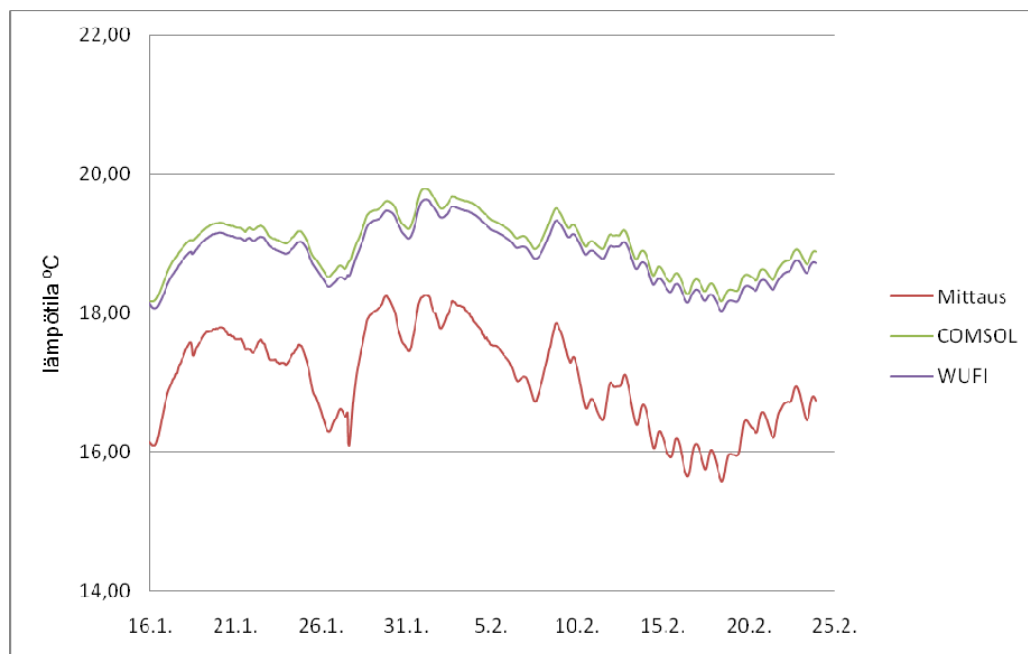
KUVA 27. Lämpötilan vaihtelu 170 mm:n päässä ulkokuoren ulkopinnasta (mittauspiste 6)

Suhteellinen kosteus mittausjaksolla mittauspisteessä 6 on hyvin alhainen (kuva 28). Sisäilman suhteellinen kosteus mittausjaksolla vaihteli 11 %:sta 18 %:iin, joten diffuusion avulla ulkoseinärakenteen läpi kulkeutuva kosteus on hyvin vähäistä, ja siten myös suhteellinen kosteus mittauspisteessä 6 on hyvin matala. WUFI- ja COMSOL-ohjelmien suhteellisen kosteuden käyrät ovat yhtenevät mittaustulosten kanssa mittauspisteessä 6.



KUVA 28. Suhteellisen kosteuden vaihtelu 170 mm:n päässä ulkokuoren ulkopinnasta (mittauspisteessä 6)

**Mittauspiste 7** sijaitsee BSW-elementin sisäkuoren betonin sisäpinnassa eli 45 mm sisäpinnasta. WUFI- ja COMSOL-ohjelmien lämpötilakäyrät ovat muodoiltaan yhtenevät mittautulosten kanssa mittauspisteessä 7, mutta tietokoneohjelmien antamat tulokset ovat noin 1-2 °C suuremmat (kuva 29).

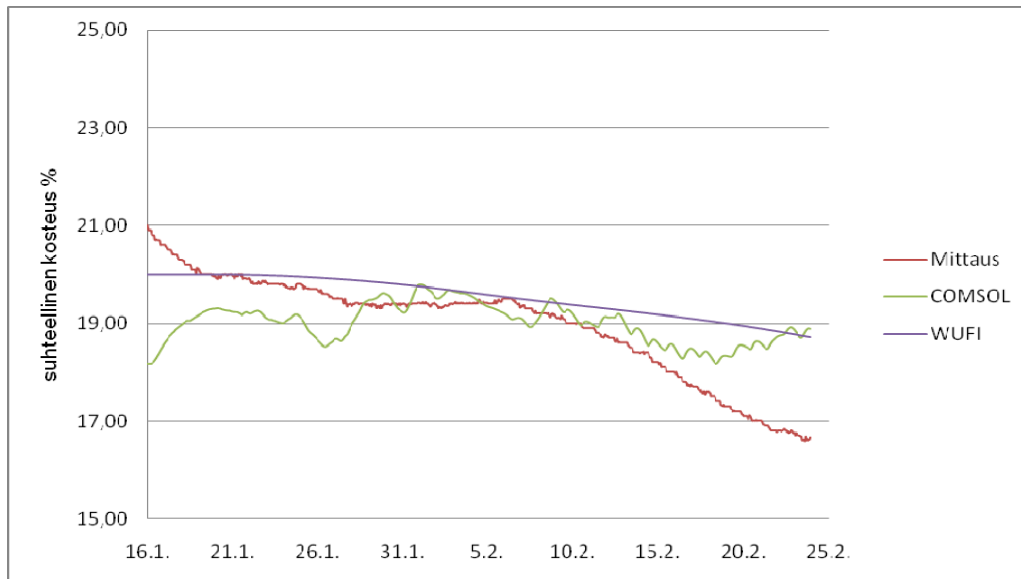


KUVA 29. Lämpötilan vaihtelu 45 mm:n päässä sisäkuoren sisäpinnasta (mittauspiste 7)

Tietokoneohjelmien ja mittaustulosten suhteellisen kosteuden käyrät ovat mittaussjakson aikana pisteessä 7 noin  $\pm 2$  %:n sisällä toisistaan.

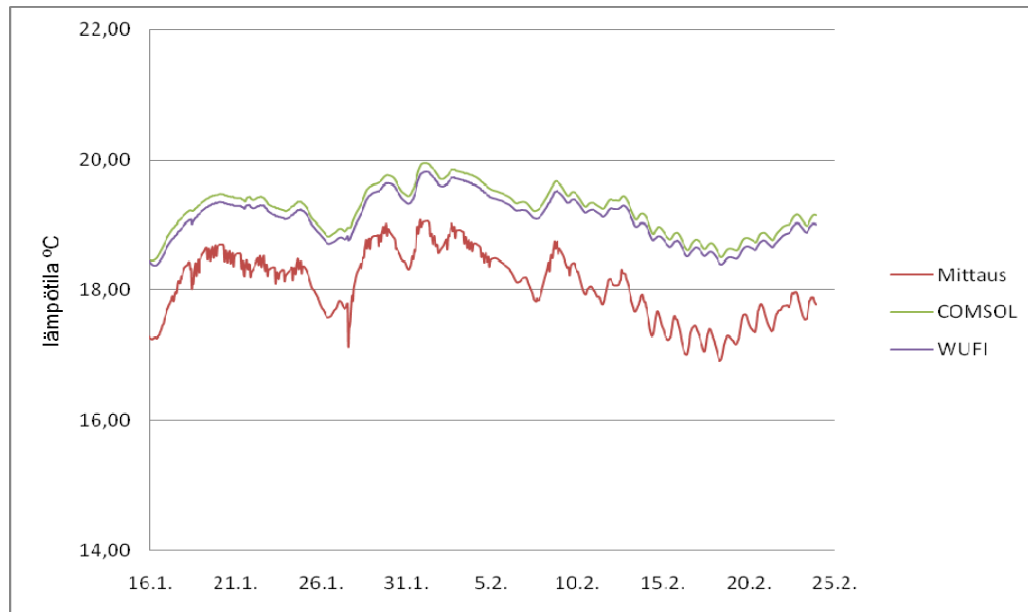
Suhteellisen kosteuden anturit asennettiin BSW-elementtiin 12.1.2011, mutta vertailukelpoisia tulokset ovat vasta, kun suhteellisen kosteuden anturi on tasaantunut betonissa 3-7 vrk eli aikaisintaan 15.1.2011. Siksi kuvassa 30 olevan mittaustulosten suhteellisen kosteuden käyrän alkuarvoja ei huomioida.

Mittausvirhemarginaali suhteellisen kosteuden antureilla on  $\pm 3,5$  %, kun lämpötila on yli nolla astetta. Kuvassa 30 olevat suhteellisen kosteuden käyrät ovat siten virhemarginaalin sisällä.



KUVA 30. Suhteellisen kosteuden vaihtelu 45 mm:n päässä sisäkuoren sisäpinnasta (mittauspiste 7)

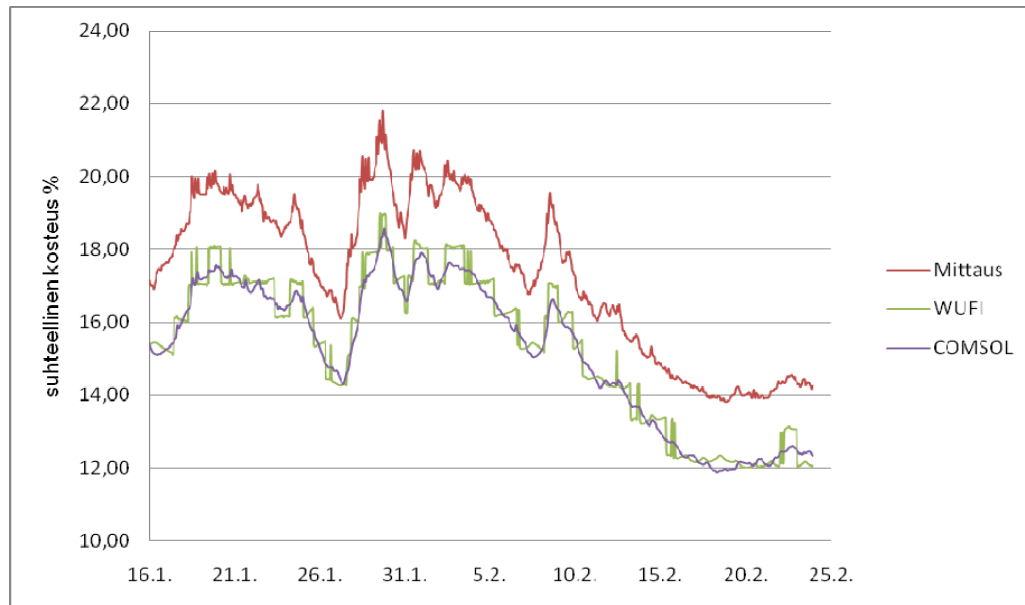
**Mittauspiste 8** sijaitsee BSW-elementin sisäkuoren sisäpinnassa. WUFI- ja COMSOL-ohjelmien lämpötilakäyrät ovat muodoiltaan yhtenevät mittaustulosten kanssa mittauspisteessä 8, mutta tietokoneohjelmien antamat tulokset ovat noin 1 °C:n suuremmat (kuva 31).



KUVA 31. Lämpötilan vaihtelu sisäkuoren sisäpinnassa (mittauspiste 8)

WUFI- ja COMSOL-ohjelmien suhteellisen kosteuden käyrät ovat mittausjakson aikana pisteessä 8 noin 1,5 % pienemmät kuin mitatut arvot (kuva 32).

Mittausvirhemarginaali suhteellisen kosteuden antureilla on  $\pm 3,5$  %, kun lämpötila on yli nolla astetta. Tietokoneohjelmien laskelmat ja mitatut arvot ovat siten mittausvirhemarginaalin sisällä.

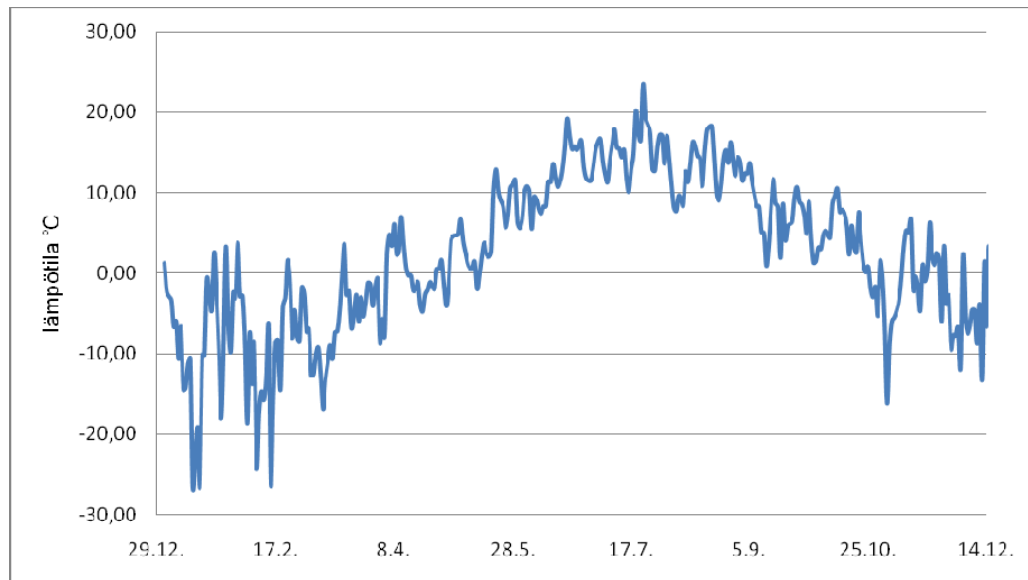


KUVA 32. Suhteellisen kosteuden vaihtelu sisäkuoren sisäpinnassa (mittauspiste 8)

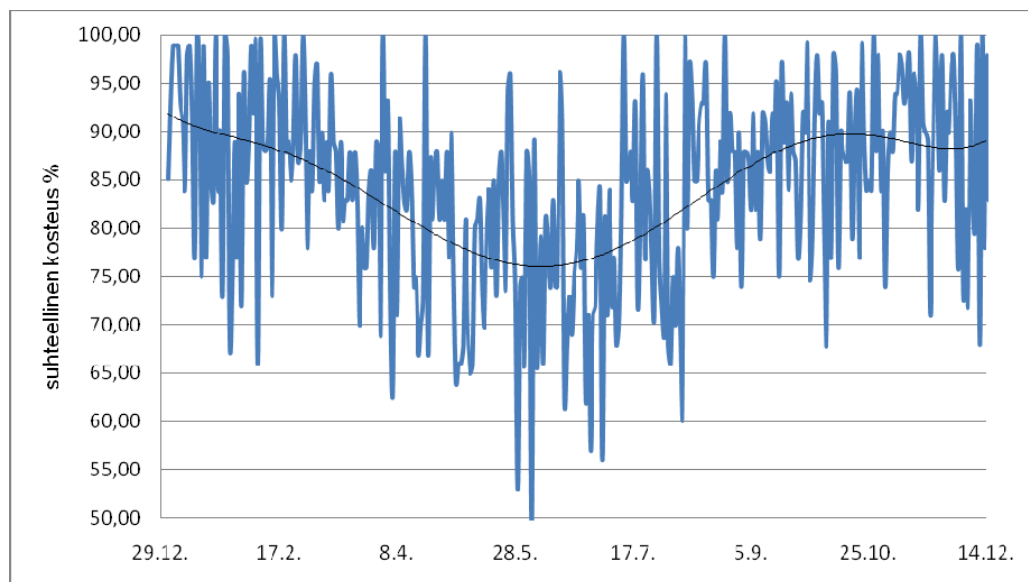
## 5.2 Lisäeristettyjen ulkoseinärakenteiden lämpö- ja kosteuslaskelmat

US2- ja US3-ulkoseinärakenteiden laskenta suoritettiin WUFI Pro 5.0 -ohjelmalla. Ulkoilman säätietoina käytettiin METEONORM-sääpalvelusta säätietoja kohteelle Oulu. Ulkoilman lämpötilan- ja suhteellisen kosteuden vaihtelut Oulussa vuoden aikana on esitetty kuvissa 33 ja 34.



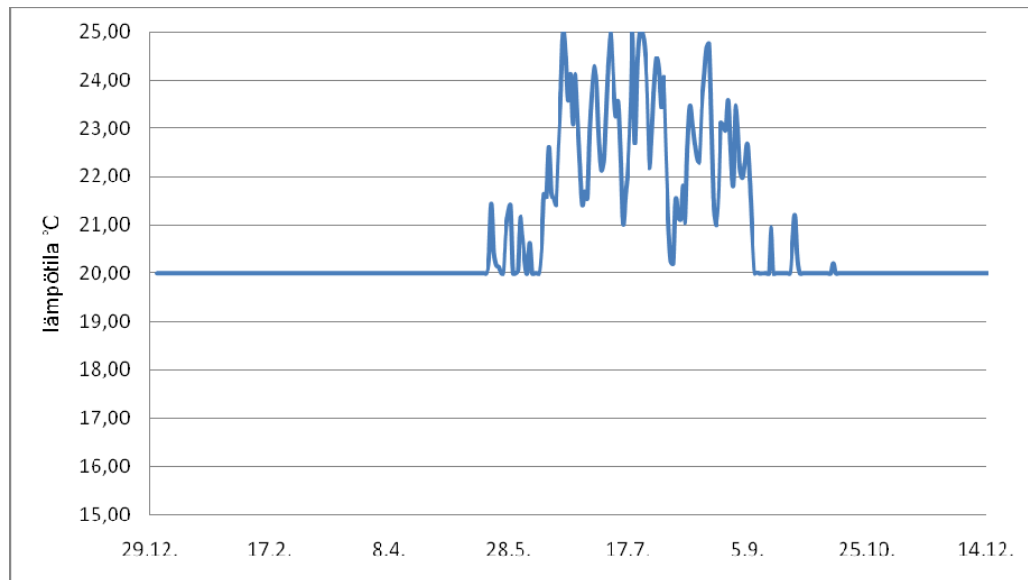


KUVA 33. Ulkoilman lämpötilan vaihtelu vuoden aikana

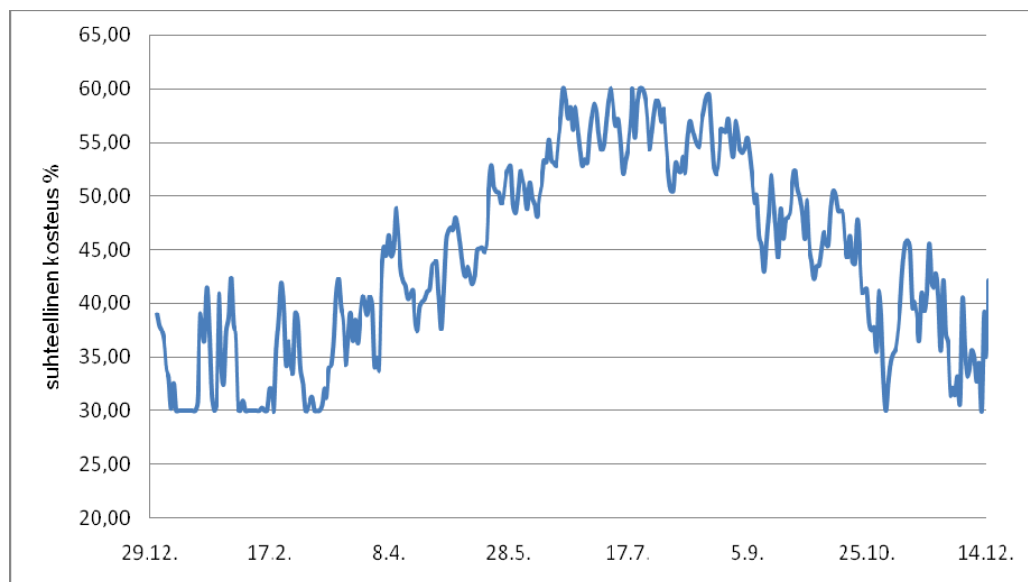


KUVA 34. Ulkoilman suhteellisen kosteuden vaihtelu vuoden aikana

Sisäilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan arvoina käytettiin WUFI-ohjelman EN 15026 -tiedostoja (kuvat 35 ja 36). Lisäeristettyjen ulkoseinä-rakenteiden US2 ja US3 lämpö- ja kosteusteknisillä laskennoilla arvioitiin mineraalivillan ja EPS-S-eristeellä eristettyjen rakenteiden toimintaa Oulun olosuhteissa.



KUVA 35. Sisäilman lämpötilan vaihtelu vuoden aikana EN 15026 mukaan



KUVA 36. Sisäilman suhteellisen kosteuden vaihtelu vuoden aikana EN 15026 mukaan

Lämpö- ja kosteyslaskelmissa käytettiin taulukossa 4 esitettyjä ulko- ja sisäpinnan siirtokertoimia.

**TAULUKKO 4. Ulko- ja sisäpinnan siirtokertoimet**

<b>Ulkopuoli</b>	<b>Yksikkö</b>	<b>Arvo</b>
Lämmönvastus	[m <sup>2</sup> K/W]	0,056
Sd-arvo	[m]	--
Lyhyt aaltainen absorptiokerroin	[-]	--
Pitkä säteilyn emissiokerroin	[-]	--
Sateen absorptio kerroin	[-]	0,7
<b>Sisäpuoli</b>		
Lämmönvastus	[m <sup>2</sup> K/W]	0,13
Sd-arvo	[m]	--

Lämpö- ja kosteyslaskennassa käytettiin seuraavia sade kertoimia (rakennus yli 20 m korkea):

1.  $R1[-] = 0$
2.  $R2[s/m] = 0,2$

Lämpö- ja kosteyslaskelmissa US2- ja US3-ulkoseinärakenteille annettiin taulukoiden 5 ja 6 mukaiset alkukosteudet.

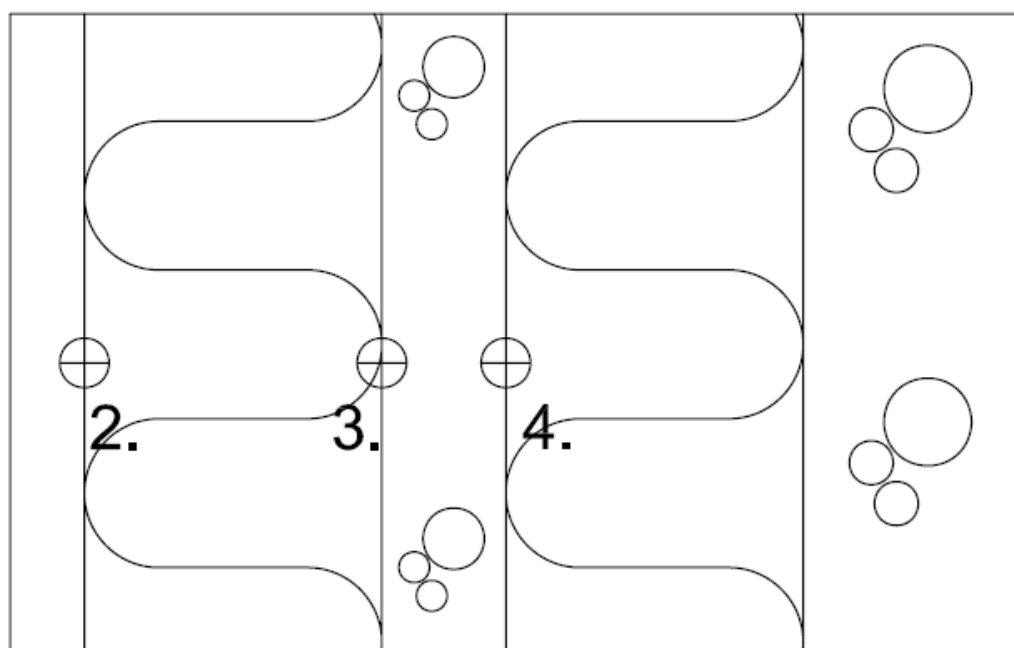
**TAULUKKO 5. US2-ulkoseinärakenteen alkukosteudet WUFI-laskennassa**

Kolmikerrosrappaus	16	[kg/m <sup>3</sup> ]
Mineraalivilla	0	[kg/m <sup>3</sup> ]
Vanhan rakenteen betoni UK	100	[kg/m <sup>3</sup> ]
Mineraalivilla	0	[kg/m <sup>3</sup> ]
Vanhan rakenteen betoni SK	40	[kg/m <sup>3</sup> ]

TAULUKKO 6. US3-ulkoseinärakenteen alkukosteudet WUFI-laskennassa

Ohutrappaus	35	[kg/m <sup>3</sup> ]
EPS-S-polystyreeni	0	[kg/m <sup>3</sup> ]
Vanhan rakenteen betoni UK	100	[kg/m <sup>3</sup> ]
Mineraalivilla	0	[kg/m <sup>3</sup> ]
Vanhan rakenteen betoni SK	40	[kg/m <sup>3</sup> ]

Laskennoissa tarkasteltiin vanhan rakenteen ulkokuoren kuivumista lisäeristeen asentamisen jälkeen sekä pisteissä 2,3 ja 4 (kuva 37) suhteellisen kosteuden ja lämpötilojen vaihtelua viiden vuoden laskentajaksolla. Laskennassa oletetaan, että lisäeristäminen suoritetaan kesäaikana. Lämpö- ja kosteuslaskennan aloitusajankohta on 1.6.2011, ja laskentajakso päättyy 1.6.2016.



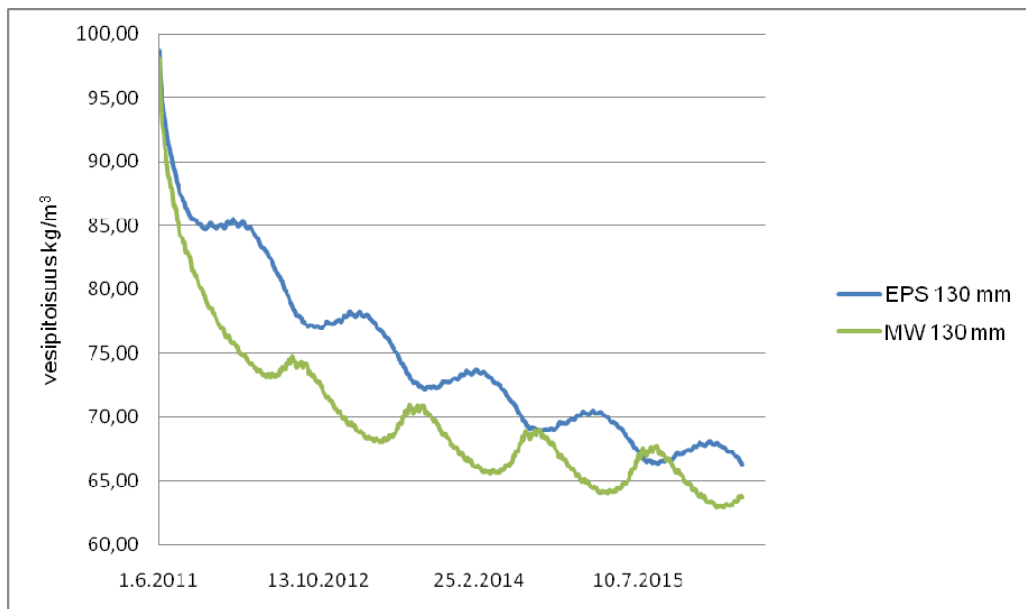
KUVA 37. Ulkoseinärakenteiden US2 ja US3 laskentapisteet

Mineraalivillan ja EPS-S-lisäeristyskseen vertailun helpottamiseksi molemmat rakenteen laskettiin saman vahvuusina. Molemmat lisäeristystapaukset täyttävät vuoden 2010 SRMk:n mukaiset vaatimukset.

## 5.2.1 Vanhan rakenteen kuivuminen lisäeristämisen jälkeen

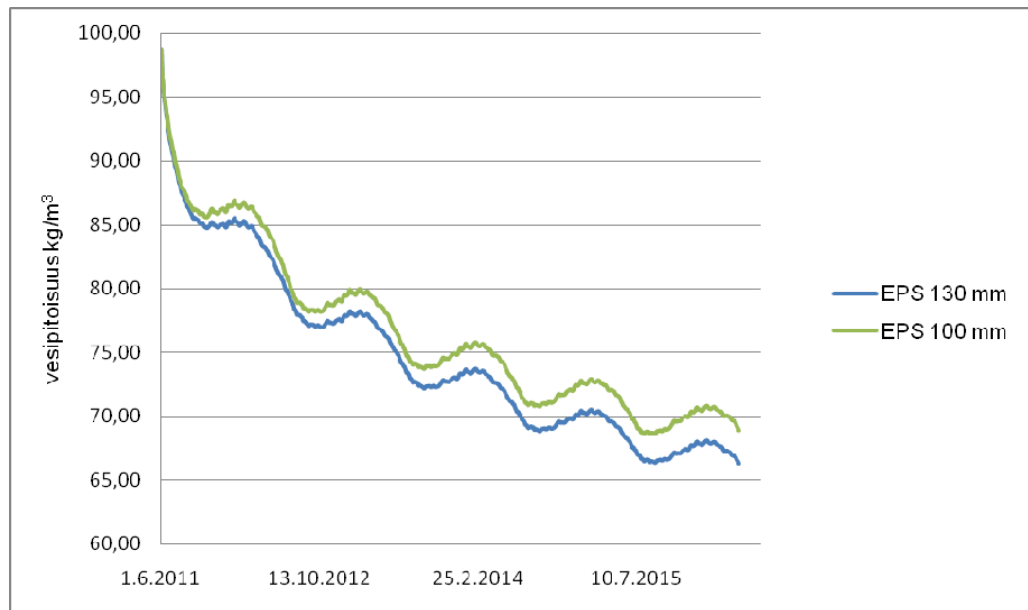
Kuvassa 38 on esitetty vanhan ulkoseinärakenteen US1 ulkokuoren kuivuminen eri eristevaihtoehtoilla laskentajakson aikana. Molemmilla eristevaihtoehtoilla vanhan BSW-elementin ulkokuoren vesipitoisuus lisäeristämisen jälkeen laskee viiden vuoden laskentajakson aikana noin  $65 \text{ kg/m}^3$ . Kuvaajasta on havaittavissa, että mineraalivillan kuivuminen on alussa nopeampaa verrattuna EPS-eristeeseen johtuen EPS-eristeen suuremmasta vesihöyryvastuksesta. Kuvaajasta on havaittavissa, että käyrät ovat edelleen laskemaan päin eli rakenne kuivuu edelleen molemmilla eristevaihtoehtoilla.

Kuvaajaa tulkittaessa on huomattava, että EPS-eriste on pinnaltaan ohutrappattu ja mineraalivilla on kolmikerrosrapattu, joten kuvaajat eivät siten ole täysin vertailukelpoiset. Ohutrappaus on tiiviimpi verrattuna kolmikerrosrapaukseen. Kuvaaja siis kertoo kahden Suomessa yleisimmin käytetyn eristerrappausmenetelmän vaikutuksesta vanhan ulkokuoren kuivumiseen.



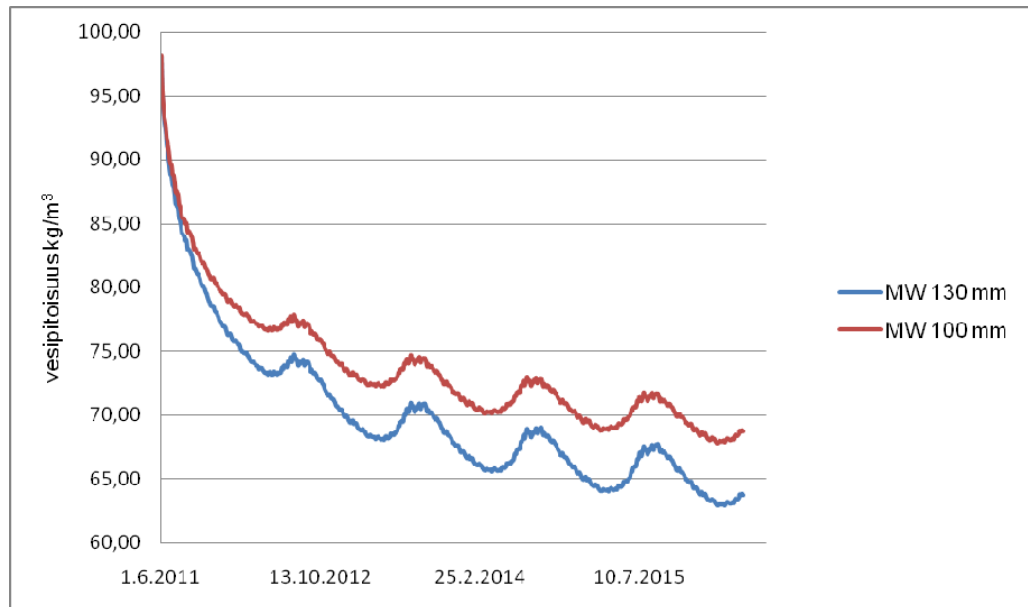
KUVA 38. Vanhan ulkokuoren kuivuminen eri eristemateriaaleilla

Suhteellisen kosteuden jakauma eri vahvuisilla EPS-eristeillä on esitetty kuvassa 39. Vahvempi EPS-eriste kuivattaa vanhan BSW-elementin ulkokuorta hiukan nopeammin kuin ohuempi EPS-eriste. Ero hiukan kasvaa laskentajakson loppua kohden. Erot ovat kuitenkin hyvin pieniä. Käyrät ovat laskentajakson lopussa vielä laskevia eli kuivumista tapahtuu edelleen.



KUVA 39. EPS-S-eristeen vahvuuden vaikutus vanhan ulkokuoren kuivumiseen

Suhteellisen kosteuden jakauma eri vahvuisilla mineraalivillaeristeillä on esitetty kuvassa 40. Vahvemmallalla mineraalivillalla eristetty rakenne kuivattaa vanhan BSW-elementin ulkokuorta nopeammin huolimatta kosteuden ”pidemmästä matkasta” ulkoilmaan. Tämä johtuu siitä, että mineraalivillan vesihöyryn vastus on pieni ja vanha ulkokuori pääsee kuivumaan periaatteessa sitä nopeammin, mitä vahvemmin lisäeristystä asennetaan.

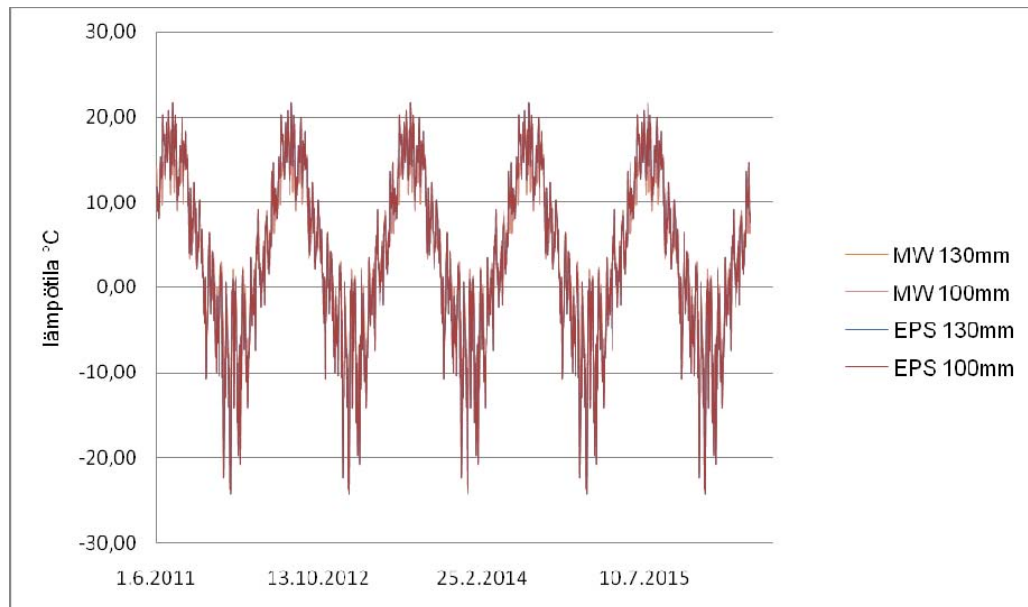


KUVA 40. Mineraalivillan vahvuuden vaikutus vanhan ulkokuoren kuivumiseen

### 5.2.2 US2- ja US3-ulkoseinärakenteiden lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaihtelut laskentapisteissä

Lisäeristettyjen rakenteiden suhteellisten kosteuksien ja lämpötilojen vaihteluja viiden vuoden laskentajakson aikana tarkasteltiin kuvassa 37 (s. 59) esitetyissä mittauspisteissä.

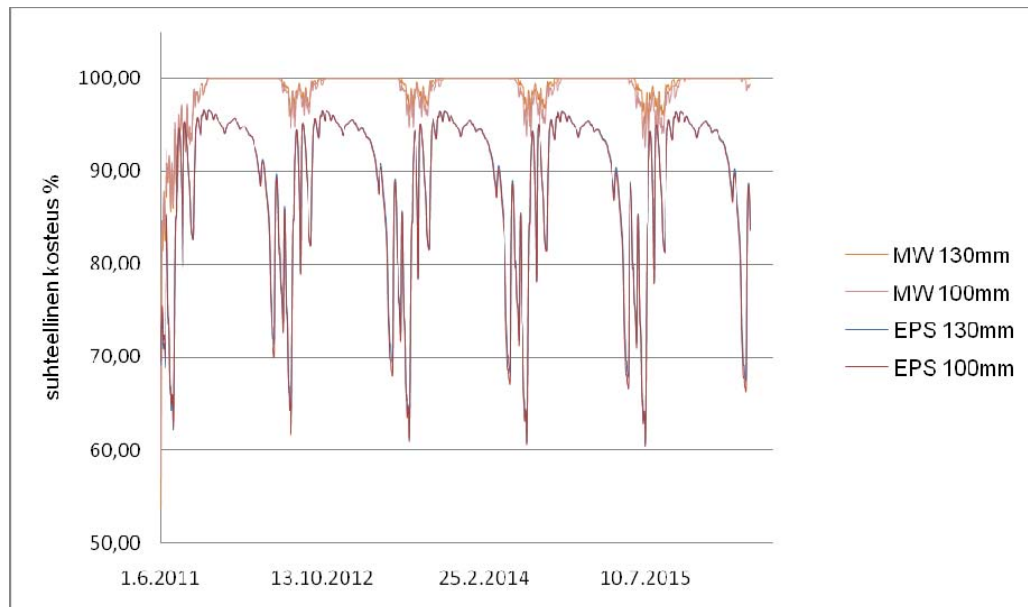
Laskentapiste 2 sijaitsi ulkokuoren rappauksen alla. Lämpötilan vaihtelut ovat yhtenevät molemmilla eristemateriaaleilla (kuva 41), koska molempien lämmöneristeiden lämmönjohtavuuden arvot olivat WUFI-ohjelman tietokannassa samat ( $\lambda=0,04$ ). Samanvahvuisilla eristeillä ei ole laskentapisteen lämpötilan vaihteluissa eroa laskentajakson aikana.



KUVA 41. EPS-S ja mineraalivillan lämpötilan vaihtelut rappauksen alla (laskentapiste 2)

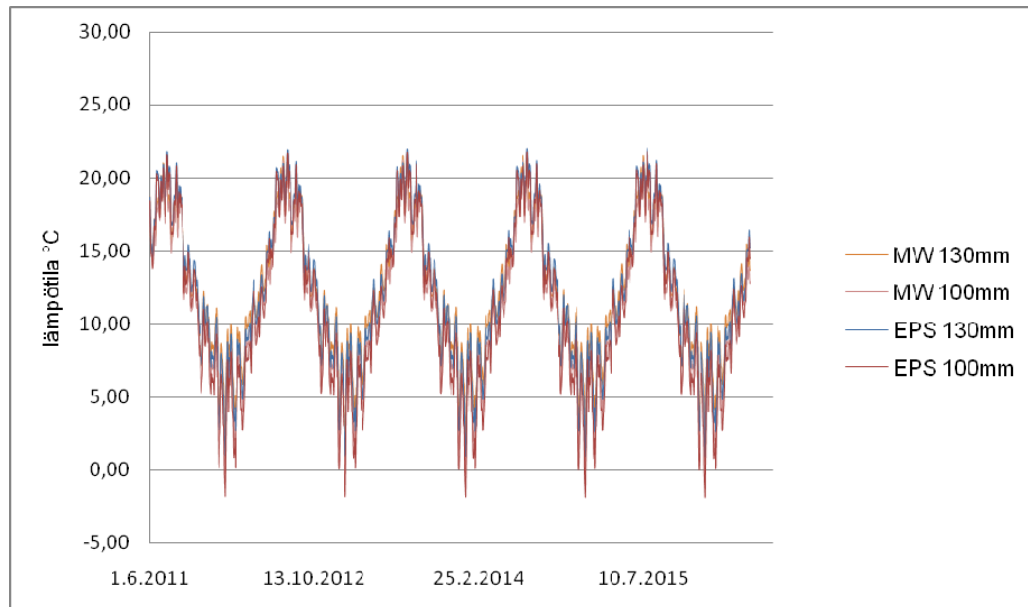
Suhteellisen kosteuden vaihtelut laskentapisteessä 2 on esitetty kuvassa 42. Mineraalivillalla lisäeristetty rakenne on kolmikerrosrapattu ja EPS-eristeellä lisäeristetty rakenne on ohutrappattu. Mineraalivillan ulkopinnan suhteellinen kosteus vaihtelee 93 %:sta 100 %:iin mittausjakson aikana. EPS-eristeen ulkopinnan suhteellinen kosteus vaihtelee vuoden ajasta riippuen noin 60-93 %:n välillä. Mineraalivillan ulkokuori on pidemmän aikaa kosteana kuin EPS-eristeen ulkokuori. Nämä edellä mainitut asiat johtuvat rappauksen ominaisuuksista. Ohutrappaus on tiiviimpi kuin kolmikerrosrappaus ja ei siten ime itseensä vettä samalla tavoin kuin kolmikerrosrappaus. Kolmikerrosrappauksen suhteellinen kosteus on 100 % keskimäärin marraskuusta toukokuuhun saakka laskentatulosten mukaan.





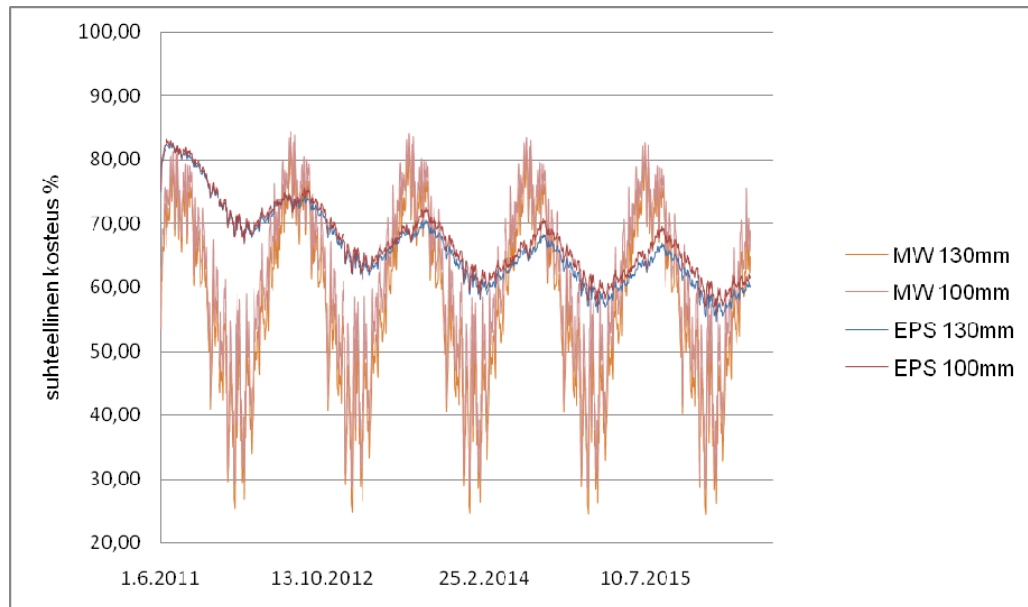
KUVA 42. EPS-S ja mineraalivillan suhteellisen kosteuden vaihtelut rappauksen alla (laskentapiste 2)

Laskentapiste 3 sijaitsi lisälämmöneristeen sisäpinnassa. Lämpötilan vaihtelut ovat yhtenevät molemmilla eristemateriaaleilla (kuva 43), koska molempien lämmöneristeiden lämmönjohtavuuden arvot olivat WUFI-ohjelman tietokannassa samat ( $\lambda=0,04$ ). Samanvahvuksilla eristeillä ei ole laskentapisteen lämpötilan vaihteluissa eroa laskentajakson aikana.



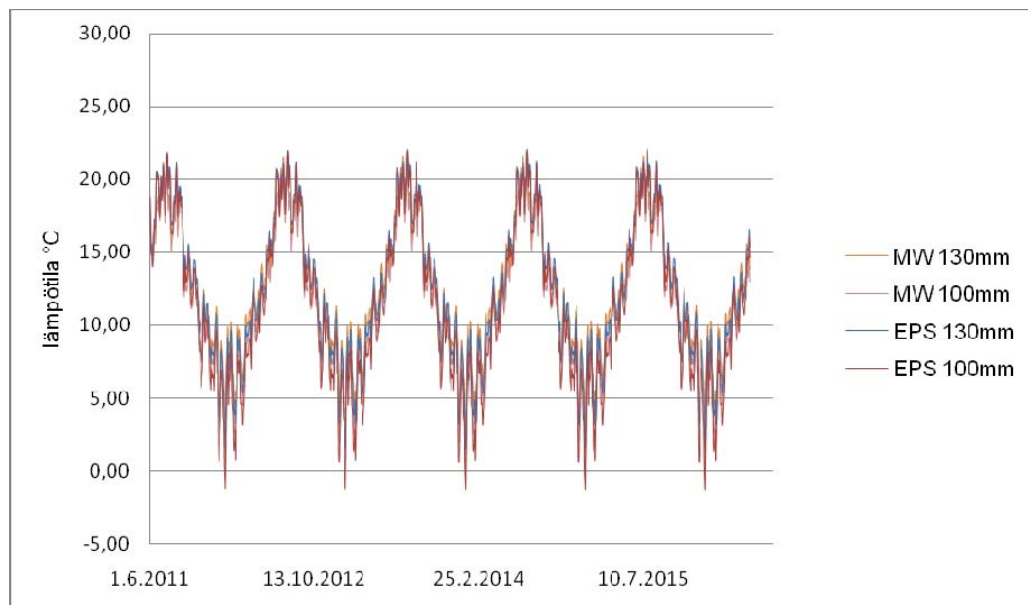
KUVA 43. EPS-S ja mineraalivillan lämpötilan vaihtelut lisälämmöneristeen sisäpinnassa (laskentapiste 3)

Suhteellisen kosteuden vaihtelut laskentapisteessä 3 eroavat eri eristemateriaaleilla selvästi toisistaan. Mineraalivillan suhteellisen kosteuden vaihtelut ovat huomattavasti suuremmat kuin EPS-eristeen. Tämä johtuu siitä, että mineraalivilla ja kolmikerrosrappaus ovat hyvin vesihöyryä läpäisevät materiaalit. EPS-eristeellä vesihöyryläpäisevyys on pieni, joten suhteellisen kosteuden vaihtelut mittauspisteessä 4 ovat siten huomattavasti pienemmät. Molemmilla eristevaihtoehdoilla laskentapisteen suhteellinen kosteus on laskeva koko laskentajakson ajan.



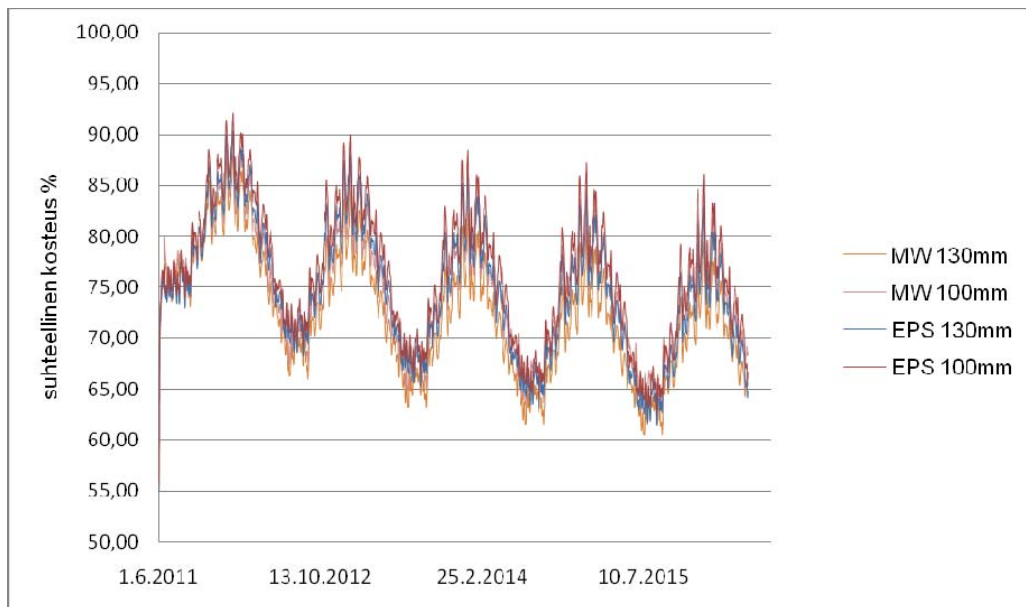
KUVA 44. EPS-S ja mineraalivillan suhteellisen kosteuden vaihtelut lisälämmöneristeen sisäpinnassa (laskentapiste 3)

Laskentapiste 4 sijaitsi vanhan lämmöneristeen ulkopinnassa. Lämpötilan vaihtelut ovat yhtenevät molemmilla eristemateriaaleilla (kuva 45), koska molempien lämmöneristeiden lämmönjohtavuuden arvot olivat WUFI-ohjelman tietokannassa samat ( $\lambda=0,04$ ). Samanvahvaisilla eristeillä ei ole laskentapisteen lämpötilan vaihteluissa eroa laskentajakson aikana.



KUVA 45. EPS-S ja mineraalivillan lämpötilan vaihtelut vanhan ulkokuoren sisäpinnassa (laskentapiste 4)

Suhteellisen kosteuden vaihtelut laskentapisteessä 4 ovat lisäeristemateriaalista riippumatta samankaltaiset ja sen vaihteluväli on sama. Kyseisen laskentapisteen suhteellinen kosteus on loivasti laskeva koko mittausjakson ajan. Diffuusiolla liikkuva kosteuden suunta on pääsääntöisesti sisältä ulospäin, joten vanhan ulkokuoren alkukosteus kuivuu pääsääntöisesti ulospäin eikä siten lisää suhtellista kosteutta laskentapisteessä 4, vanhan lisäeristeen ulkopinnassa.



KUVA 46. EPS-S ja mineraalivillan suhteellisen kosteuden vaihtelut vanhan ulkokuoren sisäpinnassa (laskentapiste 4)

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyössä tarkasteltiin lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa kolmella eri ulkoseinärakenteella; US1, US2 ja US3. Lisäksi ulkoseinärakenteelle US1 tehtiin lämpö- ja suhteellisen kosteuden mittaukset.

Aluksi käsiteltiin ulkoseinärakenteen lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa sekä lämpö- ja kosteuslaskentaosuudessa laskettavat eristerapatut rakenteet. Sen jälkeen mittauskohteeseen asennettiin suhteellisen kosteuden anturit ja lämpötila-anturit. Kyseiset mittaukset suoritettiin välillä 16.1.2011 - 23.2.2011 As Oy Kaijohakan Itä-julkisivulla. Rakenteesta tallennettiin suhteellisen kosteuden ja lämpötilan arvot tiedonkeruulaitteeseen tunnin välein. Lopuksi ulkoseinärakenne US1 laskettiin WUFI Pro 5.0- ja COMSOL Multiphysics -ohjelmilla ja saatuja tuloksia verrattiin mittaustuloksiin. US2- ja US3-ulkoseinärakenteiden lämpö- ja kosteuslaskelmat suoritettiin WUFI-ohjelmalla.

**Ulkoseinärakenteen US1** mittauspisteiden lämpötilat laskentajakson aikana tietokoneohjelmilla laskettuina ovat lähellä mittaustulosten antamia arvoja. Myös suhteellisen kosteuden mittaustulokset noudattelevat suhteellisen hyvin WUFI- ja COMSOL-ohjelmien laskemia suhteellisen kosteuden arvoja. Erityisen hyvin mittaukset ja laskelmat toimivat yhteen, kun lämpötila on yli 0 °C:n ja suhteellinen kosteus matala. Kun suhteellinen kosteus on yli 80 % ja lämpötila pakkasen puolella, tietokoneohjelmien ja mittaustulosten ero kasvaa suhteellisten kosteuksien osalta. Mittausvirhemarginaali suhteellisen kosteuden anturille on  $\pm 3,5$  %, kun lämpötila on yli nolla astetta, ja  $\pm 5$  %, kun lämpötila on alle nolla astetta.

Kun lämpötila on matala ja suhteellinen kosteus korkea, olisi syytä tietää mallinnettavan rakenteen materiaaliominaisuudet hyvinkin tarkkaan, jotta tietokonesimulointi olisi luotettavaa. Materiaalivalmistajat pääsääntöisesti ovat selvittäneet lämpö- ja kosteusominaisuuksia vain yhdessä lämpötilassa.

Lämpö- ja kosteyslaskelmissa käytettiin WUFI- ja COMSOL-ohjelmien materiaalitietokantoja. Todellisuudessa lämmöneristeen lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet eivät ole samat kyseisissä materiaalitietokannoissa ja mittaustulosten kohteessa. Esimerkiksi laskelmissa käytetyt vanhan lämmöneristeen  $\lambda_n$  arvo laskelmissa on 0,04 W/m°C, joka on lähes tämän päivän lämmöneristeen lämmönläpäisyarvo. Kuten WUFI:n, COMSOL:n ja mittaustulosten vertailusta huomataan, vaikutusta tällä on lähinnä silloin, kun rakenteen lämpötila on pakkasella ja suhteellinen kosteus korkea.

Ulkoseinärakenteen US1 lämpö- ja kosteyslaskelmien tulosten pohjalta voidaan todeta, että rakenteen todelliset ja tietokone-ohjelmilla lasketut tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan mittausrvirhemarginaalien puitteissa. Tietokonelasenta ohjelmien käyttö kosteusteknisessä tarkastelussa on siten perusteltua.

Mineraalivillalla **lisäeristettyjen ulkoseinärakenteiden US2 ja US3** vertailussa havaittiin eristeen tiiveyden ja vahvuuden vaikutukset vanhan rakenteen ulkoseinärakenteen lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan.

Lisäeristysmateriaalilla ei ole rakenteen lämpötiloihin vaikutusta, jos lämmönjohtavuus arvot ovat samat, kuten tässä opinnäytetyössä suoritettujen lämpö- ja kosteyslaskelmat osoittavat. Esimerkiksi laskentapisteen 3 kuvaajasta havaitaan, että vahvuudella on merkitystä rakenteen lämpötiloihin. Laskentapisteen lämpötilat ovat sitä suuremmat, mitä paksumpi on eriste. Vielä merkittävämpi ero olisi, jos vertailtavien eristevahvuuksien ero olisi suurempi.

Lisäeristettyjen rakenteiden toimintaa seurattiin muun muassa vanhan BSW-elementin ulkokuoren kosteuspitoisuuden osalta ja tuloksista havaittiin, että eristemateriaalin tiiveydellä on merkitystä rakenteen kuivumiseen. Vanhan BSW-elementin pintaan asennettu mineraalivillaeriste kuivuu alussa nopeammin kuin EPS-eriste, koska mineraalivillaeristeen vesihöyrynläpäisevyys on suurempi kuin EPS-eristeen. Vanhan ulkokuoren kosteus pääsee siis vaivammin poistumaan ulkoilmaan. Vanhan rakenteen ulkokuoren kuivuminen on molemmilla eristemateriaaleilla koko viiden vuoden laskentajakson ajan laskeva, ja laskee edelleen.

Kuvaajia tulkittaessa on huomattava, että ohutrappaus EPS-eristeen pinnassa on tiiviimpi kuin kolmikerrosrappaus mineraalivillan pinnassa. Tämä selittää sen, miksi mineraalivilla lisäeristetty käyrä lävistää kuvaajassa EPS-eristeen käyrän. Pitemmällä aikavälillä on oletettavaa, että vanhan ulkokuoren kosteuspitoisuus asettuu eristemateriaalista riippumatta lähes samaan arvoonsa. Viiden vuoden laskentajakson lopussa vanhan rakenteen ulkokuoren kosteuspitoisuus on molemmilla eristemateriaaleilla noin  $65 \text{ kg/m}^3$ .

US2- ja US3-ulkoseinärakenteiden suhteellisia kosteuksia laskettiin mittauspisteissä 2, 3 ja 4. Lisäeristykseen rappausten alla (laskentapiste 2) havaitaan kolmikerrosrappausten ja ohutrappausten ero. Kolmikerrosrappausten suhteellinen kosteus on pitkän aikaa 100 %, kun ohutrappaus tiiviimpänä rappauksena ei ime itseensä vettä samalla tavoin ja sen suhteellinen kosteus laskentapisteessä on korkeimmillaan 93 %. Suhteellinen kosteus lisälämmöneristykseen sisäpinnassa (laskentapiste 3) on havaittavissa myös selkeää eroa. Mineraalivillalla lisäeristetyt rakenteet suhteellisen kosteuden vaihtelut ovat huomattavasti suuremmat kuin EPS-eristeen. Ulkoseinärakenne US2 eli mineraalivillalla lisäeristetty rakenne on ikään kuin hengittävämpi kuin suuren vesihöyryn tiiveyden omaava EPS-eriste. Laskentapisteen 4 eli vanhan rakenteen lämmöneristyskerroksen ulkopinnan suhteellisen kosteuden käyrissä ei esiinny juurikaan eroavaisuutta. Vanhan BSW-elementin ulkokuori kuivuu diffuusiolla pääsääntöisesti ulospäin, joten materiaalin tiiveydellä ei ole merkitystä suhteellisen kosteuden arvoihin laskentapisteessä 4.

Tässä opinnäytetyössä ei tarkasteltu yllättävistä tai äkkilisistä vuotoista aiheutuvia ongelmia lisäeristämisen lämpö- ja kosteustekniseen toimivuuteen. Edellä mainituista asioista johtuen rakenteisiin kulkeutuvat vesimäärät ovat huomattavasti suuremmat kuin diffuusion avulla rakenteeseen kulkeutuvat vesimäärät. Tämä on syytä ottaa huomioon erityisesti EPS-eristeen asennusaikaisessa suojauksessa, joka tiiviimpänä materiaalina päästää hitaammin rakenteesta kosteutta pois.

US2- ja US3-ulkoseinärakenteiden lisäeristämällä haluttiin saada varmuutta kahden Suomessa yleisimmin käytetyn eristerappaus menetelmän soveltu-

vuudesta vanhan BSW-elementin lisäeristämiseen. Lämpö- ja kosteustekninen tarkastelu osoittaa, että molemmat materiaalit toimivat vanhan BSW-elementin lisäeristämisessä, kun ottaa huomioon tiiveydestä aiheutuvat asennustekniset seikat.



## LÄHTEET

1. Vapaavuori, Jan 2008. Asuntonministeri Jan Vapaavuori Pohjois-Suomen rakentajapäivillä. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=297394&lan=FI>. Hakupäivä. 15.2.2011
2. Kangas, Ilkka – Hietala, Jari – Hyypöläinen, Tarja – Pentti, Matti – Rajala, Lasse – Rämö, Juha – Rautiainen, Liisa – Pesonen, Juha – Haarti-Katajainen, Jutta – Kiiras, Juhani – Koivula, Tuomas – Luhanka, Juha 1998. Uudet betonijulkisivurakenteet. Jyväskylä: Suomen Betonitieto Oy.
3. Pentti, Matti – Hyypöläinen, Tarja 1999. Ulkoseinärakenteiden kosteustekninen suunnittelu. Tampere: TTKK.
4. EPS 2000 –tuoteluokitus. 2006. Saatavissa: <http://www.eps-eriste.fi/fin/tuoteluokitus>. Hakupäivä. 8.1.2011.
5. Lehtoviita, Timo – Laine, Ensio – Alitalo, Sanna 2004. Rakennusfysiikkaa rakennusinsinööreille. Kosteus. Opintojakson oppimateriaali syksyllä 2010. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
6. Siikanen, Unto 1996. Rakennusfysiikka. Perusteet ja sovellukset. Helsinki: Rakennustieto.
7. Vinha, Juha – Valovirta, Ilkka – Korpi, Minna – Mikkilä, Antti – Käkelä, Pasi 2005. Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona. Saatavissa: <http://www.tut.fi/units/rak/rtek/tutkimusraportit/Raportti129.pdf>. Hakupäivä. 16.9.2010.
8. Björkholtz, Dick 1987. Lämpö ja kosteus. Helsinki: Rakentajain Kustannus Oy.

9. RT 37790. 2009. EPS-lämmöneristeet. Rakennustieto Oy. Saatavissa: <http://www.rakennustieto.fi/Downloads/Tarviketieto/pdf/37790.pdf>. Hakupäivä: 1.4.2011.

10. Rakennetyypit ja detaljit. 2010. Saatavissa: <http://www.e-weber.fi/rapatut-julkisivut/asiantunteva-suunnittelu/rakennetyypit-ja-detaljit/serporoceristerappaus-rakenneyksityiskohdat-korjausrakentaminen.html>. Hakupäivä: 8.3.2011.

11. Siimes, Suvi-Anne – Ahokas, Raimo 2002. Suomen rakentamismääräyskokoelma C4. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/data/normit/1931-C4s.pdf>. Hakupäivä: 1.3.2011.

12. RT 14-10675. 1998. Betonin suhteellisen kosteuden mittaus. Rakennustieto Oy. Saatavissa: <http://www.termolog.fi/downloads/betonimittaus.pdf>. Hakupäivä: 25.1.2011.